

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**TÜRKİYE ULUSAL KUVVETLİ YER HAREKETİ  
İSTASYONLARI İÇİN PERİYOT BAZLI SİSMİK ZEMİN  
SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

**HAMDULLAH LİVAOĞLU**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**TÜRKİYE ULUSAL KUVVETLİ YER HAREKETİ**  
**İSTASYONLARI İÇİN PERİYOT BAZLI SİSMİK ZEMİN**  
**SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

**HAMDULLAH LİVAOĞLU**

**Prof. Dr. Fadime SERTÇELİK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN**  
**Jüri Üyesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi** .....

**Prof. Dr. Orhan Dede POLAT**  
**Jüri Üyesi, Dokuz Eylül Üniversitesi** .....

**Doç. Dr. Ergin ULUTAŞ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 18.05.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi istasyonlarında kaydedilen depremler incelenerek zeminlerin sismik sınıflamasına dair yeni yaklaşımlar uyarlanarak geliştirilmeleri amaçlanmıştır.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, bana güvenen ve yüreklendiren danışmanım Prof. Dr. Fadime SERTÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın başından itibaren değerli katkılarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ, Doç. Dr. Ergin ULUTAŞ, Doç. Dr. T. Serkan IRMAK, ve Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Akademik çalışmalarım sırasında, birçok aşamada beni destekleyen Jeofizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi ve araştırma görevlilerine teşekkür ediyorum. Ayrıca çalışmada veri analizlerinin hızlandırılması ve programlaması konusunda yardımını esirgemeyen ve katkı koyan Harita Mühendisliği bölümünden Dr. Erman Şentürk'e teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan kıymetli büyükbabam Arif LİVAOĞLU'na başta olmak üzere çekirdek ve geniş aileme canı gönülden teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık – 2020

Hamdullah LİVAOĞLU

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ .....	1
1. SİSMİK YER HAREKETİ VERİSİ.....	11
1.1. Depremler Ve Sismik Dalgalar.....	11
1.2. Deprem Yer Hareketi.....	14
1.3. Deprem Yer Hareketinin Frekans Özellikleri.....	15
2. YEREL ZEMİNLERİN BÜYÜTME POTANSİYELLERİ.....	19
2.1. Yerel Zeminlerin Transfer Özellikleri .....	19
2.1.1. Zemini Tanımlayan Parametreler.....	20
2.1.2. Zeminlerin Model Tabanlı Nitelendirilmesi .....	21
2.1.3. Zemin Tepki Analizlerine Tesir Eden Durumlar .....	21
2.2. Transfer Fonksiyonunu Elde Etmede Analitik (Teorik) Yöntemler .....	27
2.2.1. Bir Boyutlu Yer Altı Profiline Ait Teorik Transfer Fonksiyonu .....	28
2.2.2. Teorik Yatay/Düşey (H/V) Spektral Oran Yaklaşımları.....	34
2.3. Zemin Transfer Fonksiyonlarını (Büyütmeler) Ve Baskın Periyotlarını Elde Etmede Deneysel (Aletsel) Yaklaşımlar.....	38
2.3.1. Deprem Tepki Spektrum Oranları (RHV).....	40
2.3.2. Deprem Fourier Spektrum Oranları (FHV) .....	42
2.4. Farklı Zemin Tepki Analiz Kestirimlerinin Değerlendirilmesi .....	44
3. ALETSEL (DENEYSEL) TABANLI SİSMİK ZEMİN SINIFLAMA .....	47
3.1. Zemin Sınıflamasının Amacı.....	47
3.2. Zemin Sınıflama Şemaları.....	50
3.2.1. Sıklık İlişkili Sınıflama .....	52
3.2.2. Sıklık Ve Derinlik İlişkili Sınıflama .....	55
3.2.3. Hibrit (Melez) Sınıflama .....	56
4. VERİ SETİ VE İŞLENMESİ .....	61
4.1. Analize Tabi Tutulacak Deprem Verilerinin Eleme Kıstasları .....	62
4.1.1. TR-KYH Gözlem Ağına Ait İstasyonlarda El Edilen Sayısal Bilgiler.....	64
4.2. Deprem Sinyallerinin Zaman Ortamı Veri İşlemi .....	67
4.2.1. P ve S fazlarının otomatik seçimi.....	69
4.2.2. Deprem Sinyallerinin Radyal-Tanjansiyel Dönüşümü ve HVSR Analizlerine Etkileri .....	73
4.3. Deprem Sinyallerinin Frekans Ortamı Veri İşlemi.....	76
5. SPEKTRAL ŞEKİLLER .....	80
5.1. Tepki ve Fourier Spektral Oranlarının Karşılaştırılması .....	81

5.2. Farklı Deprem Ve İstasyonların Spektral Şekiller Üzerindeki Etkileri .....	88
5.2.1. Farklı Depremlerin Aynı İstasyonlardaki Tepki Spektrum Çözümleri .....	88
5.2.2. Aynı Depremin Farklı İstasyonlardaki Tepki Spektrum Çözümüle .....	91
5.3. Spektral Şekillere Ait Çıktıların $V_{S30}$ 'lar İle İlişkisi .....	94
5.4. Ortalama Spektral Şekiller .....	98
5.4.1. Jeolojik ve Litolojik Formasyon Temelli Spektral Şekiller .....	98
5.4.2. Baskın Periyot Ve $V_{S30}$ Temelli Spektral Şekiller .....	101
6. ZEMİNLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	106
6.1. Deprem Yönetmelikleri Kapsamında Zeminlerin Sınıflandırılması .....	107
6.2. Sismik Zemin Sınıflama Yöntemi .....	111
6.2.1. Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı .....	111
6.3. Zemin Sınıf Belirlemeleri .....	114
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	121
KAYNAKLAR .....	125
EKLER .....	135
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	169
ÖZGEÇMİŞ .....	171

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Analizlerde kullanılan ve/veya elenen elastik dalgaların yayılma ve parçacık hareket yönleri (Holstein, 2007) .....	12
Şekil 1.2.	a) 2020 MW 6.8 Erzincan depremi KIZO istasyonuna ait veri işlem geçirmiş ivme kayıtları ve spektrumları. b) Depremi Doğu-Batı bileşenine ait spektrogram.....	15
Şekil 1.3.	a) 4130 (solda) ve 920 (b, sağda) istasyonlarında kaydedilen farklı deprem büyüklüklerinin spektral şekiller ve frekans özelliklerine etkisi. ....	16
Şekil 1.4.	3503 kodlu istasyonda kaydedilen depremlerin tepki spektrum oranları. Renkli eğriler her bir depreme ait eğrileri temsil ederken gri gölgeler %95 güven aralıklı bölgeyi siyah kesikli çizgi etrafını satan dikdörtgen kırmızı gölge de baskın periyoda ait standart sapmayı temsil etmektedir.....	17
Şekil 2.1.	Farklı kritik sönüm faktörlerinin yarı sonsuz mühendislik anakayasını örten homojen zemin tabakası üzerinde büyütme özelliklerine olan etkisi .....	23
Şekil 2.2.	Farklı kesme dalga hızları ve kalınlıkların 1-B transfer fonksiyonu üzerinde etkileri .....	23
Şekil 2.3.	5.7 büyüklüğündeki Simav depremi analizi yapılan çevreleyen istasyonlara ait uydu üç boyutlu düzlemde görüntüsü .....	26
Şekil 2.4.	Simav depremi (5.7)'nin farklı iki istasyondaki ivme kayıtları (üs) ve %5 sönümlü tepki spektrum oranları (altta) .....	27
Şekil 2.5.	Elastik ana kaya üzerindeki zemin tabakaları ve hesaplamada kullanılan terimlerin gösterimi. Çizim temsili ve ölçeksiz olup tabakalar yatay yönde de sonsuz uzanmaktadır .....	32
Şekil 2.6.	Doğrusal yaklaşım ile transfer fonksiyonu ve yüzey çıktı hareketi hesabı. a) Sivrice Depremi yatay ivme kaydı (girdi hareketi). b) Kaydın Fourier Genlik Spektrumu. c) Üç tabakalı model zemin profili. ç) SH transfer fonksiyonu. d) Yüzey çıktı hareketi. e) Yüzey çıktı hareketinin Fourier genlik spektrumu. Fourier genlik birimindeki N, ilgilenilen frekans için zaman serisi verisinin örneklemesine bağlı nokta sayısını belirtmektedir.....	33
Şekil 2.7.	Teorik büyütme ve tepki spektrum oranlarının karşılaştırılması .....	37
Şekil 2.8.	Teorik büyütme ve Fourier spektrum oranlarının karşılaştırılması .....	38
Şekil 2.9.	Kaynaktan zemine SH dalga hareketi ve Eşitlik 2.18'e bağlı zemin etkisinin belirlenmesi.....	39
Şekil 2.10.	TSD Sönümlü sistemin yer hareketi etkisinde yer değiştirmesi .....	40
Şekil 2.11.	2020 İzmir depreminin AFAD 3513 kodlu istasyonun kaydedilen dalga formları ve tepki spektrum ve oranları (kayıtlar yukarıdan aşağıya E (Doğu-Batı), N (Kuzey-Güney) ve düşey bileşenlerdir.....	42
Şekil 2.12.	Fourier dönüşümünün grafiksel temsili gösterimi .....	42

Şekil 2.13.	2020 İzmir depreminin AFAD 3513 kodlu istasyonun kaydedilen dalga formları ve Fourier spektrum ve oranları (kayıtlar yukarıdan aşağıya E (Doğu-Batı), N (Kuzey-Güney) ve düşey bileşenlerdir).....	43
Şekil 2.14.	Depremin 3513 kodlu istasyon kaydına ait tepki ve tasarım spektrumlarının karşılaştırılmasıalışma alanı ve depremler.....	45
Şekil 3.1.	Zemin tabalarına ait zemin sınıfları ve tasarım spektrumları üzerinden yapıya etkilerinin basit anlatımı .....	49
Şekil 3.2.	Sahaya özel yer altı zemin sınıflarının olası kombinasyonları, Alman deprem yönetmeliğine göre DIN 4149 (DIN, 2002, Lang ve diğ., 2003).....	56
Şekil 3.3.	Normalize edilmiş tepki spektrumu (a) ve H/V spektral oranları (b) LEE ve diğ., 2001 tarafından önerilen hibrit zemin sınıflaması için (şekiller (a) Seed ve diğ., 1976 ve (b) Lee ve diğ., 2001)'den alınmıştır). .....	58
Şekil 3.4.	Di Alessandro C., (2012) önerdiği zemin sınıflama HVSR eğrileri .....	59
Şekil 4.1.	İstasyonlarda kaydedilen tüm depremlerin episantr uzaklığının bir fonksiyonu olarak en yüksek ivmelerine ve büyüklüklerine göre gösterimi.....	63
Şekil 4.2.	Yeşil üçgenler istasyonları temsil ederken, üzerlerinde resmedilen siyah çubuklar kayıt ettikleri deprem sayısını göstermektedir. Sağ alttaki haritada depremlerin büyüklüklerine göre daire boyutları ölçeklendirilmiş olup renkler de derinlik bilgisini göstermektedir. ....	64
Şekil 4.3.	Zemin sınıflaması için TR-KYH istasyonlarının beş bölgeye ayrılmasını gösteren harita .....	65
Şekil 4.4.	Bölgelere ait toplam istasyon ve deprem Sayıları.....	66
Şekil 4.5.	a) Çalışmada için tasarlanan bant geçişli IIR sayısal Butterworth filtresini temsil eden mavi eğri ile bant aralıklarını gösteren kırmızı kesikli çizgiler. b)Etkin yer frekanslarının ham spektrum üzerinden gösterimi .....	68
Şekil 4.6.	3116 kodlu istasyona kaydedilen 4Mw büyüklüğündeki filtrelenmiş bir deprem sinyaline ait üç bileşen ivme kaydının gürültü ve sinyal kısımları.....	69
Şekil 4.7.	Aynı depremin Doğu-Batı (a) bileşeni ile Kuzey-Güney (b) bileşenlerine ait otomatik faz seçimleri.....	71
Şekil 4.8.	Otomatik dS kısımlarına ait seçimler. ....	72
Şekil 4.9.	Manuel (a) ve otomatik (b) dS faz ve kısımları için sonuçların karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.10.	Yatay ve teğetsel düzlemlerin deprem kaynağına göre gösterimi. K-G: Kuzey-Güney, D-B: Doğu-Batı, R:Radyal, T:Tanjansiyel ve Z: Düşey bileşenleri gösterirken Ø 'da yayılım doğrultusuna olan azimutu göstermektedir .....	74
Şekil 4.11.	İstanbul depreminin en yüksek yer ivmesini kaydeden istasyonda yatay bileşen dönüşüm sonuçlarının karşılaştırılması, Kırmızı sinyal ve tepki spektrumları radyal-tanjansiyel düzleme ait iken mavi renkteki sonuçlar da yatay düzleme aittir. Sismogramlar üzerindeki siyah bölgeler dS kısımlarını göstermektedir.....	75

Şekil 4.12. Kayan ortalama ve Konno-Ohmahci yumuşatmalarının karşılaştırılması .....	77
Şekil 4.13. Yumuşatmaların (fhvko:konno-ohmahci, fhvmm:kayan ortalama) spektral oranlardaki etkileri ve karşılaştırmaları. Koyu siyah eğriler, istasyonda kaydedilen depremlere ait Fourier spektral oran (fhvsr) eğrilerinin (renkli) ortalamalarını temsil etmektedir. Kırmızı çizgili dikdörtgen kutular zemin baskın periyotlarındaki standart sapmaları temsil ederken kırmızı kesikli çizgilerde genliklerdeki güven aralığını göstermektedir. ....	79
Şekil 5.1. Analiz edilen depremlerin derinlik-büyükliklerine (renkli daireler) göre dağılımı ve istasyonların (yeşil üçgenler) kaydettiği veri sayısının ölçeklendirilmesi (siyah dikey çubuklar).....	82
Şekil 5.2. Fourier (fhvko ve fhvmm ile yumuşatılmış) ve tepki spektrum oranlarına ait ortalama spektral şekiller. Mavi eğriler ortalama istasyonlarda kaydedilen tüm spektral eğrilerin ortalamasını gösterirken kırmızı kesikli çizgiler ise standart sapmaları göstermektedir.....	83
Şekil 5.3. 8110 kodlu istasyona ait Fourier spektral oranları. Siyah kalın çizgi ortalama spektrumunu kırmızı kesikli çizgiler ise +1 standart sapmalara ait, %95 güvenlik sınırlarını temsil etmektedir. Kesikli kalın çizgi zemin baskın periyotlarına işaret ederken gölgeli kısımlarda baskın periyotların standart sapma aralıklarını temsil etmektedir.....	85
Şekil 5.4. 3112 ve 3144 kodlu istasyonlara ait FHV ve RHV'lerin karşılaştırılması .....	86
Şekil 5.5. Anakaya üzerinde kurulu 3122 kodlu istasyona ait FHV ve RHV'lerin karşılaştırılması) .....	87
Şekil 5.6. TDBY 2018'e göre tüm zemin sınıflarını temsil eden istasyonlarda analiz edilen tepki spektrum oranlarına ait spektral biçimlerinin; episantr uzaklıklarına, büyüklüklerine ve en yüksek yer ivmelerine göre gösterimi. ....	90
Şekil 5.7. Kırmızı yıldız depremin merkez üssünü gösterirken yeşil üçgenler de depremi kayıtlarının analiz edildiği istasyonları göstermektedir.....	91
Şekil 5.8. Aynı depreme ait yakın ve uzak alan spektral şekillerin karşılaştırılması. ....	92
Şekil 5.9. Deprem merkez üssü ve istasyonlarda kaydedilen en yüksek yer ivmesi büyüklükleri haritası. Kırmızı noktalar istasyonlarda kaydedilen ivmelerin büyüklüklerine göre olan boyutlarını göstermektedir. Depremin odak mekanizması çözümü de AFAD ilksel raporuna göre doğrultu atım bileşenine sahip ters faylanmaya işaret etmektedir. Haritada ki altlık ise topoğrafya ve renkler de temel jeolojik formasyonları göstermektedir. ....	92
Şekil 5.10. 46 istasyona ait tepki spektrum sonuçları .....	93
Şekil 5.11. Her bir bölgeye ve tüm Ulusal ağa ait istasyonlardaki hesaplanan $V_{s30}$ ve baskın periyotların uyumları. Kırmızı kalın çizgiler kestirilen doğruyu, renkli noktalara baskın periyotları ve onlara karşılık gelen spektral oran genliklerini göstermektedir. Kesikli mavi çizgiler %95 güven sınırlarını temsil etmektedir. Her	



	bölgeye ve tüm Ulusal ağı ait uyumun istatistiksel parametreleri ve denklemler şekil kutucuklarında gösterilmiştir. ....	95
Şekil 5.12.	Her bir bölgeye ve tüm Ulusal ağı ait istasyonlardaki hesaplanan $V_{S30}$ ve büyütme uyumları. Kırmızı kalın çizgiler kestirilen doğruyu, renkli noktalara baskın periyotları ve onlara karşılık gelen spektral oran genliklerini göstermektedir. Kesikli mavi çizgiler %95 güven sınırlarını temsil etmektedir. Her bölgeye ve tüm Ulusal ağı ait uyumun istatistiksel parametreleri ve denklemler şekil kutucuklarında gösterilmiştir. ....	97
Şekil 5.13.	Sismojenik bölgelere göre jeolojik yaş temelli spektral şekiller (üstte) ve %95 güvenilirlik bandı içerisinde ortalamaları (altta).....	99
Şekil 5.14.	Sismojenik bölgelere göre litoloji temelli spektral şekiller (üstte) ve %95 güvenilirlik bandı içerisinde ortalamaları (altta).....	100
Şekil 5.15.	TR-KYH ağına ait bilinen yerel zemin Sınıfları ve zemin sınıfları henüz belirlenmemiş istasyonlar .....	102
Şekil 5.16.	Yerel zemin sınıfları temelinde hesaplanmış ortalama spektral eğriler .....	103
Şekil 5.17.	Zemin baskın periyot temelli spektral eğrileri .....	104
Şekil 6.1.	Kesme dalga hızı tabanlı baskın periyotların TDBY'ye göre (a) ve JRA'ya (b) göre histogramları.....	108
Şekil 6.2.	Önerilen periyot tabanlı sınıflama ölçütlerine göre deprem sayılarının gösterimi (Periyot eksenini logaritmiktir) .....	110
Şekil 6.3.	İstasyon zeminlerinin sınıflandırılmasına ait akış şeması.....	113
Şekil 6.4.	İstasyonlara ait yerel zemin sınıfları kestirimi .....	114
Şekil 6.5.	İstasyonlara ait periyot bazlı zemin sınıfları kestirimi .....	115
Şekil 6.6.	TDBY 2018'e göre yerel zemin grupları bilinen istasyonlar ve önerilen yaklaşıma göre kestirilen grupların karşılaştırılması .....	116
Şekil 6.7.	Yerel zemin sınıfları bilinmeyen istasyonlara zemin sınıfı atanması.....	117
Şekil 6.8.	Kestirilen ve kestirilemeyen zemin sınıflarına ait istasyonların harita üzerinde gösterimi.....	118
Şekil 6.9.	Periyot bazlı zemin gruplarına ait istasyonlar kestirim başarılarının karşılaştırılması.....	119

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Sismik dalga türleri ve genlik-frekans özellikleri Dalga hızları yukardan aşağıya doru azalmaktadır .....	13
Tablo 2.1. Zemini tanımlayan parametrelerin birbirleriyle ilişkileri .....	20
Tablo 2.2. Teorik H/V hesaplamaları için istasyonlara ait zemin modelleri. Vp: P-dalga hızı, Vs: Kesme dalga hızı, Q: Kalite Faktörleri, $\rho$ =Yoğunluk, H: Tabaka Kalınlıkları .....	37
Tablo 2.3. Deprem verilerine uygulanan spektral oranların (HVSR), sismik gürültü oranları (HVNR) ve standart spektral oranlara (SRSR) göre uyum kalitesini gösteren bazı çalışmalar (T0: Baskın periyotlar, A0: Baskın Genlikler, ELTF: Eşdeğer doğrusal zemin tepkisi çözümü). .....	44
Tablo 3.1. Farklı Zemin sınıflama şemalarının özellikleri (NSPT: Standart penetrasyon deney vuruş sayısı, Gdyn: kayma modülü).....	51
Tablo 3.2. Geomatrix sınıflama sistemi .....	51
Tablo 3.3. Farklı zemin sınıflama şemalarının karşılaştırılması.....	52
Tablo 3.4. Sıklık ilişkili Venezuela deprem yönetmeliği (MDU, 1990).....	52
Tablo 3.5. 1997 Uniform Building Code'a göre zemin sınıflaması (ICBO, 1997).....	53
Tablo 3.6. TBDY 2018 Yerel Zemin Sınıfları .....	54
Tablo 3.7. Farklı zemin koşullarının Alman deprem yönetmeliğine göre tanımlanması, DIN 4149 (DIN, 2002) .....	55
Tablo 3.8. 1997-UBC (United Building Code) baz alınarak yapılmış zemin kategorileri basitleştirilmiş hibrit zemin sınıflaması (Bray ve Rodríguez-Marek, 1997; tablo Rodríguez-Marek et al., 2001 yeniden türetilmiştir). .....	58
Tablo 3.9. C., Di Alessandro C., (2012)'nin önerdikleri periyot bazlı sınıflama .....	59
Tablo 3.10. Periyot tabanlı Japon zemin sınıflaması.....	60
Tablo 5.1. İstasyonlara ait her bir analiz ve yöntem için elde edilen sonuçla .....	84
Tablo 5.2. Çalışma kapsamında önerilen periyot aralıkları ve büyütme değerleri .....	105
Tablo 6.1. Mühendislik tasarım çalışmaları için Japon Zemin sınıf karakteristikleri ve bunlara karşılık gelen Türk ve Amerikan yönetmeliklerinin eşdeğer sınıfları (Japan Road Association, 1990; NEHRP,2001; TBDY,2018) .....	108

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha_z$	: Sismik empedans oranı
$\nu$	: Poisson oranı
$\gamma$	: Kesme deformasyonu
$\tau$	: Kesme gerilmesi
$\rho$	: Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )
$\xi$	: Zemin sönüm faktörü
$AMP_p$	: Düşey yönde yayılan P dalga büyütmesi
$AMP_s$	: Düşey yönde yayılan S dalga büyütmesi
H	: Tabaka kalınlıkları (m)
E	: Elastisite modülü (Pa)
G	: Kayma modülü (Pa)
c	: Işık hızı (m/sn)
dS	: Kesme (S) dalga fazı
dP	: P dalga fazı
$G_{maks}$	: Düşük gerilme deformasyonlardaki kesme gerilmesi
$f_c$	: Merkez (köşe) frekansı (Hz)
$f_i, f_s$	: Harmoniklere bağlı zemin frekansları ve zemin baskın frekansı (Hz)
fhvko	: Konno-Ohmahci ile yumuşatılmış Fourier spektral oran genliği
fhvmm	: Kayan ortalama ile yumuşatılmış Fourier spektral oran genliği
$\sigma_0$	: Hareket denkleminde dalga genliği
$\beta$	: Doğal salınım periyoduna göre frekans
$T_0, \omega_0$	: Sistemin doğal salınım periyodu ve açısal frekansı
k	: Dalga sayısı
R	: Sismik kaynağa olan uzaklık (km)
Q	: Kalite faktörü
$q_n^* e^{-i\omega_n t}$	: Hareket denklem çözümü ve Fourier serilerinde kullanılan Fourier katsayıları ve Euler eşitliği
$H(\omega_n)$	: Sistem salınımına ait açısal frekans bağımlı transfer fonksiyonu
M	: Deprem büyüklüğü
Mw	: Moment magnitüdü ölçeği
Hz	: Hertz
P	: Birincil, gerilme-sıkışma dalgası
S	: İkincil, kesme dalgası
SH	: Yatay yönde polarize olan kesme dalgası
SNR	: Sinyal/Gürültü oranı
SV	: Düşey yönde polarize olan kesme dalgası
STA/LTA	: Kısa dönem ortalama ve uzun dönem ortalama oranları
Rg	: Rayleigh dalgası
Lg	: Love dalgası
M	: Deprem büyüklüğü

$V_{S30}$	: 30 metre derinliğe ait ortalama kayma dalga hızı (m/sn)
$V_p$	: P dalga hızı
$V_s$	: S dalga hızı
$V_r$	: Rayleigh dalga hızı
$V_L$	: Love dalga hızı

### **Kısaltmalar**

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
DIN	: German Institute for Standardization (Alman Standartları)
EC-8	: Avrupa Birliği binaların sismik tasarım yönetmeliği
EUROCODE	: European Standards (Avrupa Standart Serisi)
ELTF	: Eşdeğer doğrusal zemin tepkisi çözümü
FHV	: Fourier spektrum oranları
HVNR	: Deprem verilerinin yatay-düşey spektral oranları
HVSR	: Sismik gürültü yatay-düşey spektral oranları
KYH	: Kuvvetli Yer Hareketi
NEHRP	: Amerikan Ulusal Deprem Zararlarını Azaltma Programı
RHV	: Tepki spektrum oranları
SRSR	: Standart spektral oranlar
USGS	: United States Geological Survey (Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu)
TF	: Zemin transfer fonksiyonu
TR-KYH	: Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi
TDBY	: Türkiye Deprem bina yönetmeliği
TSD	: Tek serbestlik dereceli sistem

## TÜRKİYE ULUSAL KUVVETLİ YER HAREKETİ İSTASYONLARI İÇİN PERİYOT BAZLI SİSMİK ZEMİN SINIFLAMASININ GELİŞTİRİLMESİ

### ÖZET

Depremlerin yıkıcı etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen sismik zemin sınıflandırma yaklaşımları son yıllarda başta mühendislik sismolojisi olmak üzere birçok disiplin tarafından incelenip geliştirilmektedir. Global ölçekte artan sismik istasyon sayısı ve kaydedilen deprem verisi tektonik kuşak kaynaklı deprem yönetmeliklerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Deprem kaynaklı yerel zemin etkilerinin incelenmesi ve temelde deprem sinyallerinin yüzeyde oluşturduğu frekans içeriklerine bağlı yerel zemin koşullarının tespiti titiz bir veri işlem sürecine gereksinim duymaktadır. Bu sürece bağlı veri bolluğunun beraberinde getirdiği yeni yaklaşımlar zemin sınıflama çalışmalarının etkinliğini ve doğruluğunu artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi (TR-KYH) ağına bağlı istasyonlarca kaydedilen depremler kullanılarak zemin baskın periyodu temelli sismik zemin sınıflaması geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) Deprem Dairesi Başkanlığına bağlı ivme veri tabanı kullanılarak aktif tüm istasyonların (701) kayıt ettiği depremler (50389) indirilmiş ve ardından irdelenecek depremler belirli eleme ölçütleriyle elenerek (16147) analiz edilmiştir. Belirlenen bir akış şeması ışığında veri işleme tabi tutulan verilerin tüm sinyal bileşenleri kullanılarak tepki spektrumları ve oranları hesaplanarak spektrum eğrilerinin tutarlılığı araştırılmış ve diğer ülkelerde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Her bir istasyon için hesaplanan ortalama spektrum eğrileri ile baskın periyotlar ve spektral büyütme hesaplanmıştır. Türkiye Deprem Bina Yönetmeliğinde kullanılan kesme dalgası tabanlı zemin sınıflandırmasına göre zemin baskın periyotları ve büyütmeleri ile 30 m derinliğe ait kesme dalga hızları ( $V_{S30}$ ) istatistiksel olarak incelenmiştir. Çalışmada, hesaplanan ortalama spektrum eğrileri ile zemin sınıflamasında kullanılacak periyot aralıkları belirlenerek baskın periyot temelli zemin sınıflaması önerilmiştir. Ayrıca, spektral şekilleri istatistiksel bir indeks ile çözümlenerek de zemin sınıfı belli olmayan 235 istasyon için kestirim yapılarak zemin sınıfları belirlenmiş ve istasyonlar için genel uygulanabilir zemin sınıf indeksi oluşturulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem İvme Kayıtları, Sismik Zemin Sınıflama, Tepki Spektrum Oranları,

# **DEVELOPMENT OF PREDOMINANT PERIOD BASED SEISMIC SITE CLASSIFICATION FOR TURKEY'S STRONG GROUND MOTION STATIONS**

## **ABSTRACT**

Seismic site classifications have been on a development process during the recent years investigated by various disciplines, especially engineering seismology in order to mitigate the destructive effects of earthquakes. Increasing seismic stations and earthquake accelerogram data all over the globe make the tectonic region based earthquake regulations easier to improve. A diligent data process is mandatory for detecting local site conditions originated from site effects that were created by the earthquake's frequency contents on the surface. New approaches that are affiliated to big amount of earthquake data are enhancing the accuracy and efficiency of site classification studies.

In this thesis, site predominant period based seismic site classification were improved for the Turkey's National Strong Ground Motions Network including active 701 stations. First and foremost in the context of this study, all instrumental data (50389) that were detect by the stations were downloaded practically through a MATLAB based code from the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Department of Earthquake whom is the operator of the network. Aftermaths the data were eliminated (16147) and got prepared for the analyses. All three components of the data were analyzed through calculating of response spectra in consideration of a data process flowchart and compared with the other global studies investigating the reliability of the spectral ratio curves. So that, predominant periods and spectral amplifications were determined from mean response spectral ratio curves for each station. Shear wave velocities of upper most 30 m ( $V_{S30}$ ) which are used in Turkey's earthquake building regulations for the site classification were investigated statically with the predominant periods and spectral amplifications for a fair comparison of the reliability of conventional shear wave based site classification. Within this study, derived mean spectral ratio curves were used to propose predominant period range for seismic site classification. Besides, spectral shapes were analyzed with Spearman's coefficient index in order to detect the 235 unclassified stations and it is generated a general applicable site classification index.

**Keywords:** Accelerogram Data, Seismic Site Classification, Response Spectra

## GİRİŞ

Bir deprem kuvveti karşısında, sahaya göre değişen jeolojik ve jeoteknik özellikler, zeminin farklı tepkiler göstermesine neden olmaktadır. Zeminlerin sergilediği farklı büyütme ve frekans özellikleri, deprem mühendisliğinin ve mühendislik sismolojisi disiplinlerinin araştırma alanlarındandır. Özellikle büyük depremler sonrası zeminin davranışına bağlı olarak bölgede meydana gelen hasarlar, zemin özelliklerinin duyarlı bir şekilde bilinmesinin önemini de artırmıştır. Ülkemizde gün geçtikçe artan Kuvvetli Yer Hareketi (KYH) istasyonları özellikle riskli bölgelerde zemin davranışı tahmininde, temel bilgiyi üretmektedir. Farklı jeolojik-jeoteknik özelliklere sahip alanlarda kurulu istasyonların zemin bilgisi, KYH kayıtlarıyla yapılacak çalışmalarda dikkate alınan önemli girdilerdendir. Kuvvetli yer hareketi istasyonlarının konvansiyonel (geoteknik, jeofizik ve jeolojik) yöntemlerle zemin sınıflamasının belirlenmesi ekonomik olarak masraflı olmasının yanısıra zaman açısından da uzun süreli işgücü gerektirmektedir.

Mühendislik sismolojisinin esas görevlerinden biri de kaydedilen yer hareketindeki yol, zemin ve kaynak etkilerini gidermektir. Bu da genellikle bu süreçlerin zamandan bağımsız süzgeçler olduğu kabulü göz önüne alınarak gerçekleştirilir. Sismologlar kuvvetli yer hareketi verilerini sismik kaynaktan bilgi almak için kullanırken, deprem mühendisleri de yapı tasarımı, kent planlaması için kullanırlar. Bir zemindeki kuvvetli yer hareketi kestirmede kullanılan sismolojik yöntemler, kaynak, yol ve zemini temsil eden faktörlerden oluşur. Yerel zemin koşullarının yer hareketinin genliğini frekans içeriğini ve gelen sismik dalgaların süresini etkilediği bilinmektedir. Bu yerel etkileri kestirmek özellikle spektral ivme azalım ilişkileri ve mikrobölgeleme çalışmalarının birlikte ve eşgüdümlü yürütüldüğü sismik tehlike çalışmaları (Ulutaş, 2006) açısından çok önemlidir. Deprem yönetmeliklerinde öngörülen zemin etki katsayılarının yanısıra kuvvetli yer hareket denklem kestirimlerinde ve dolayısıyla deprem hasar tespitlerinde güvenilir zemin sınıflandırılmasına ihtiyaç vardır. Türkiye'nin yüksek depremselliğe sahip olmasına bağlı olarak kapsamlı depreme dayanaklı yönetmelikler kullanılmalı

ve geliştirilmelidir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne de temel teşkil eden geleneksel 30 metre derinliğe ait kesme dalga hızları zemin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır (TDBY, 2018). Sediman örtü tabakalarının transfer fonksiyonlarını ve zemin baskın periyotlarını belirlemek için mikrotremorlerin (titreşimcik) Fourier spektral oranlarını kullanan Nakamura'nın çalışmasını takiben (Nakamura, 1989), Yamazaki ve Ansary (1997) bu yaklaşımı depremlere ait yatay ve düşey bileşenlerin hız tepki spektrumlarını hesaplayarak genişletmiştir. Ghasemi ve diğ., (2009) ve Di Alessandro ve diğ., (2012) zemin etkileri ve kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sismik zemin sınıflamasını geliştirerek yatay-düşey spektral oran çalışmalarına katkıda bulunmuşlardır. Ghasemi ve diğ., (2009) çalışmalarında üç farklı yöntem ile spektral oran yaklaşımını sınamıştır. Birinci yöntemde klasik en yüksek genliğe karşılık gelen periyot temel alınarak dört temel periyot göre, ikinci yöntemde Zhao ve diğ., (2006)'da spektral şekillerin olasılıksal dağılımına göre önerdiği sınıflama ve üçüncü yöntem olarak Spearman'ın sıralama korelasyon katsayısına göre sınamaları gerçekleştirmiştir. İran ve Japonya örneklerinden toplam 451 istasyon ve 4100 kayıt ile gerçekleştirdiği çalışmada sıralama korelasyon katsayısına dayalı yöntemin diğerlerine göre daha başarılı olduğunu belirlenmiştir. Bu başarı SC-1 sınıfında %73, SC-2'de %43 ve SC-3 zemin sınıfında da %70 olarak hesap edilmiştir.

Japonya, Çin, İtalya, Hindistan ve İran'da da deprem verilerinin ve sismik gürültü verilerinin frekans içeriğinden yola çıkarak da zemin sınıflama yönetmelikleri mevcuttur ve geliştirilmektedir (Japan Road Association, 1990; Zhao, J., ve diğ.,2006;Ghasemi ve diğ., 2009; Ghofrani, H., ve diğ.,2014; Di Alessandro ve diğ.,2012; Chopra, S., ve diğ.,2018). Deprem mühendisliği ve mühendislik sismolojisi alanları, deprem yer salınımının özelliklerini belirleyen frekans içeriğine Fourier spektrumları ve tepki spektrumları vasıtasıyla ulaşmaktadır. Tepki spektrumu, sismik girdiyi kullanarak süresiz yer hareketini tanımlar ve genellikle yatay bileşenlere ait spektral ivmeleri kestirirken, Fourier dönüşümü ile yer hareketi zaman serisi çözülerek doğrudan frekans içeriğine ayrılabilir. Bora ve diğ., (2016) Zola, (2001) ve Datta, (2010) Fourier ve tepki spektrumlarının ilişkili olduğu ve zemin etkileri ve yer hareketi denklemlerine ne tür katkıda bulduklarını irdelenmiştir. İki yaklaşım arasında ilişkinin benzer sonuçlar üretmesi sinüzoidal frekans çözümlemesine



dayanmakla birlikte farklı amaçlara hizmet etmeleri ve deneysel çalışmalarda farklı sonuçlar üretmeleri yapılacak çalışmalarla daha da açığa çıkacağı düşünülebilir. Artmakta olan dijital veri imkânları ile deneysel çalışmaların büyük veri setleriyle gerçekleştirilebilmesi güç olmaktan çıkmaktadır. Sismik dalgaların sismometrelerde sinyal olarak kaydedilene kadar maruz kaldıkları kaynak ve yol etkileri giderilip zemin etkisini belirlemek için üç bileşen kayıtlardan hesaplanan transfer fonksiyonlar, (Kanai, 1952; Langston C.,1977; Nakamura, 1989) modellerin öngördüğü teorik sonuçları deneysel çalışmalarla da daha doğru ve güvenilir kılma doğrultusunda ilerlemektedir.

Günümüzde, 30 metre derinlikteki ortalama kesme dalga hızı ( $V_{s30}$ ) tüm dünyada zemini nitelendirmede temsili olarak kullanılmaktadır (BSSC, 2000; ECS, 2004; Building ve Housing Research Centre, 2003).  $V_{s30}$ ' a dayalı zemin sınıflandırılmalarının derin basenlerde toplam sediman kalınlığını dikkate almaması bir olumsuzluk yaratmaktadır. (Steidl 2000, Lang 2004). Gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarına göre (Anderson ve diğ., 1996; Park ve Hashash 2004) yüzey jeolojisi yer hareketini belirlemede önemli bir rol oynasa da, yüzeye ait özellikler zeminin sınıflamasında yeterli olmamaktadır. Mühendislik tasarım uygulamalarında, zemin tepkisi ve özellikleri en temel usul olan kesme dalgasının ortalama 30 m derinlikteki hızları ile tanımlanmaktadır. Lee ve diğ., (1995) hız tipi sismik zemin sınıflama değerlerinin belirleyici değişkenler olmadığını ileri sürmektedir. Çalışmalarında belirtilen ortalama kesme dalga hız değerlerinin daha ileri uygulamalarda geçerliliklerinin ortaya konulamadığı sonucuna varmışlardır. Öte yandan Seed ve diğ., (1976)' in zemin tipi sınıflama değişkenlerinin belirleyici olduğunu ve tüm doğrusal kuvvetli yer hareketi regresyon modellerini kapsadığını öne sürmektedir. Novikova ve Trifunac (1995)' de 30 m ortalama kesme dalgası hız değerlerinin 2,5 Hz frekanslar altında belirleyici olmadığını ve yalnız yüksek frekanslarda uygulanabilir olduğunu öne sürmektedir. Castellaro ve diğ., (2008) ise çalışmalarında  $V_{s30}$ 'ların sismik büyütme için zayıf bir temsiliyet gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bu nedenle ideal olan geoteknik ve jeofizik çalışmaların beraber yürütülmesidir. Rodríguez-Marek ve diğ., (2001) geoteknik zemin sınıflamasında birimleri sert kaya, kaya, aşınmış kaya, sert zemin, gevşek zemin, sıvılaşıma potansiyeli

olan kum olarak nitelendirmiş ve zeminin anakayaya olan derinliğini hesaba katmıştır. Fakat bu sınıflamada kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini ve derinliklerini belirlemek için ek araştırmalara ihtiyaç duyulabilir (Ulusay ve diğ., 2007). Bu kapsamda, sediman kalınlıklarını belirlemede mikrotremorlerin önemli bilgiler sağladığını tespit eden araştırmalar mevcuttur (Ibs-von Seht ve Wohlenberg, 1999; Livaoglu ve Irmak, 2017). Ghofrani ve Atkinson (2014) ise H/V (yatay ve düşey spektrum oranları) analizi bir zemin için özellikle derin zeminlerde  $V_{S30}$ 'dan daha fazla bilgi sağlayabildiğini öne sürmüşlerdir. Zhao ve diğ., (2006), Japonya için ivmeölçer kayıtlarının spektral oranlarını inceleyerek zemin sınıflaması için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada sahaya göre eğri şekilleri değişse de H/V eğrileri depremin büyüklüğünden, derinliğinden ve episantr uzaklığından etkilenmemektedir. Bu sınıflama  $V_{S30}$ 'a dayanmasa da kesme dalga hızları ve sediman kalınlıklarını temsil etmektedir. Fukushima ve diğ., (2007) bu yöntemi genişleterek Avrupa zeminleri için çalışmıştır. Zhao ve diğ., (2006) H/V spektral oranlarından zeminleri baskın periyotlarına göre dört sınıfa ayırmıştır (SC-I - SC-IV). Fukushima ve diğ. (2007) 5 sınıf için Alessandro ve diğ. (2012) da İtalya deprem istasyonları için kuvvetli yer hareketi verileri ile yedi sınıf olarak önermiştir. Bu kapsamda Zhao ve diğ. (2006) tarafından Japonya için önerilen, sonrasında Fukushima ve diğ., (2007), Ghasemi ve diğ., (2009), Di Alessandro ve diğ. (2012) ve Chopra ve diğ., (2017) tarafından da geliştirilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarına zemin sınıf belirlemelerine yönelik yeni yaklaşım ülkemizde sayıları gün geçtikçe artan KYH istasyonları içinde yapılması önem taşımaktadır. Yoshimitsu ve diğ., (2007) çalışmasında ivme-azalım ilişkilerinde tepki spektrumları ile hesaplanan zemin katsayılarını etkin kullanıp (SC-I vb.) kaya/gevşek zemin kısıtlamasını genişletmiş kestirilen tepki spektrumlarını ve spektral ivmenin daha doğru bir şekilde hesaplanacağını önermiştir. Bunun yanısıra ampirik yer hareketi tahminlerini hesaplamada HVSR (deprem kayıtlarının yatay ve düşey bileşenlerin spektral oranı) baskın periyotları ve  $V_{S30}$  parametreleri kullanılarak hesaplanan eşitliklerin standart sapmasının daha da azaldığı gözlemlenmiştir (Lussou ve diğ., 2001). Daha önce AFAD tarafından belirlenen zemin sınıflarının bu yeni yaklaşımla ilk defa çalışma alanı için yapılması ve elde edile sonuçlarla diğer yöntemlerle belirlenmiş zemin sınıflandırılmalarının karşılaştırılıp irdelenmesi de ana hedefler arasındadır. Son

olarak bu konuda Sedaghati ve diğ., (2020) tarafından Orta Asya'da en genç ve aktif orojen kuşağını oluşturan Tanrı Dağları boyunca uzanan yirmi dört istasyon tarafından kaydedilen iki bin yüz on dokuz (2119) deprem kaydı incelenerek HVSR oranlarına dayalı zemin sınıflama çalışması gerçekleştirilmiştir. Baskın periyot belirlemeye dayalı, deprem sinyalinin tüm dalga formuna ve farklı fazları ait karşılaştırmaları da içeren bu çalışmada, HVSR'lerin ters çözümleri ile  $V_{s30}$  bilgileri de elde edilmiş ve Geoteknik parametrelerle de karşılaştırılarak doğruluğu sınanmıştır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki sınıflamalar NEHRP normlarından yola çıkarak EUROCOD-8 zemin sınıflamasıyla eşdeğerdir. Fakat EUROCOD ve NEHRP  $V_{s30}$ 'un yanısıra daha derin etkileri dikkate almaktadır. 2007 yönetmeliğinde bu yerel sınıflamalar karakteristik spektrum periyotları ile belirtilmekte idi. Fakat yeni yönetmelikte dikkate alınmadığı anlaşılmaktadır. Burada amaç yönetmeliğe bir eleştiriden farklı olarak periyot bazlı sınıflamaların konvansiyonel yöntemlere göre uygulanabilirliğinin deneysel olarak araştırılmasıdır. Elde olan ivme veri tabanıyla sonuçlar üretilecek, karşılaştırılacak ve hibrit bir yaklaşım olanağı doğabilecektir. İstasyonların ve verilerin azlığı ileride sahada mobil ölçümlerle giderilebilir ve yerel ölçekteki zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynayabilir. Bu kapsamda zayıf yer hareketi, farklı fazların ve sismik gürültü verilerinin analizi konusunda ikna edici çalışmalar mevcuttur (Satoh ve diğ.,2001 ; Nath ve diğ., 2003; Setiawan ve diğ., 2018). Asten ve diğ., (2014) Kuzey Anadolu fay zonu tarafından şekillendirilen dağlık bölgelerdeki Mezozoik döneme ait anakayalardan sediman vadilere değin kuzey-batı Anadolu'da gerçekleştirdikleri çalışma ile sismik gürültü verilerini kullanarak zemin karakterini ortaya koymuşlardır. Burada HVSR ve SPAC (Konumsal Oto Kolerasyon) yöntemlerinin beraber kullanımı daha yüksek çözünürlüklü (düşük frekanslarda kesme dalga hız değişimi) sonuçlar elde edilmesinde etkili olmuştur.

Bir zemin sahasının sismik tepki özellikleri, baskın frekans ve sönüm oranı gibi zemin tabakasının çeşitli anahtar dinamik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Depreme karşı yapı tasarımında kullanılan yönetmelikler çoğunlukla güvenilir yeraltı zemin sınıflaması yapmak için mühendislik anakayasına kadar olan derinlikteki malzeme birikintilerinin mekanik özelliklerine bağlı kesme dalga hız bilgisini dikkate alırlar

(NEHRP (Yapılar için Sismik Güvenlik konseyi (BSSC), 2003), Eurocode 8 (Standartlaştırma için Avrupa Birliği Komisyonu (CEN), 2004, TBDY, 2007). Bu yaklaşımı kısıtlayan jeofizik verilerin elde edilmesindeki masraflar araştırmacıları güvenilir ve daha uygun yöntemlere itmektedir (Lee ve diğ., 2001; Zhao ve diğ., 2006; Fukushima ve diğ., 2007; Sokolov, 2007; Di. Alessandro ve diğ., 2012; Ghofrani ve diğ., 2014; Beneldjouzi ve diğ. 2015; Chopra ve diğ., 2017). Deprem verilerinin yanı sıra sismik gürültü verisi olarak nitelendirilen kayıtlar kullanılarak elde edilen HVNR (sismik gürültü verilerinin spektral oranları) büyütme eğrileri bu yöntemlerden biridir (Satoh ve diğ., 2001 ; Nath ve diğ., 2003; Setiawan diğ., 2018). Özellikle sismik zemin sınıflama prosedürlerinde HVSR yaklaşımını güvenilir bir şekilde kullanmak için dikkat ve düzenleme gerektiren birçok veri işlem aşamasından geçmeli ve istatistiksel testlerle ilişkili stokastik yaklaşımlar ile de sınanması gerekmektedir. Söz konusu sınamanın HVSR eğrileri üzerinde yapılan çalışmalarda zaman ve konum durağanlığı deprem spektrumlarıyla kıyaslanabilir örtüşme sergilediği ve güvenilirliğin birçok deneysel çalışmada sağlandığı görülmüştür (Ghasemi ve diğ., 2009; Ji, ve diğ., 2017).

Yerel zemin koşulları, dinamik bir yük altında yapı ve zemin baskın periyotları birbirlerine yakın değerler üretirlerse binalara hasar verebilecek düzeyde genellikle farklı dalga periyot aralıklarında zemin büyütme ve küçültme (deamplifikasyon) gösterirler. Bu fenomen bir çok yıkıcı depremde gözlemlenmiştir (Kocaeli Depremi  $M_w=7.1$ , Çin, 2013 Lushan  $M_s 7.0$  Depremi (Ren ve diğ., 2013), 2014 Ludian  $M_s 6.5$  depremi (Jive diğ., 2014a), ve 2014 Jinggu  $M_s 6.6$  depremi (Dai ve diğ., 2015). Kuvvetli yer hareketi verileri gelişen teknoloji ile gözlemsel ve kayıtsal niteliklerinin artması sonucu birçok ülkede kurulan sismik ağlarla toplanmaktadır. Kuvvetli yer hareketi istasyonlarının zemin sınıflaması, sismik tehlike çalışmaları ve yapı tepkileri çalışmalarında önemli görevi bulunmaktadır. Örneğin yer hareketi kestirim denklemlerinde (GMPEs) zemin etkisi aynı uzaklık ve büyüklükteki depremlerde bile farklı zemin koşulları için dikkate değer bir şekilde değişebilmektedir. Yeni nesil sönümlenme modellerinde (NGA) zemin etkisi terimi  $V_{S30}$ 'lar ile olarak tanımlansa da son yıllarda zemin baskın periyodu ile sınıflama alternatif bir yol olarak önümüze çıkmaktadır. (Takahashive diğ.,2000, Zhaove diğ., 2006, Fukushima, 2007, Di Alessandro ve diğ., 2012).

Deprem hasarları ile zemin şartları arasında kuvvetli ilişkiyi göz önüne alarak deprem yönetmeliklerinin farklı kategorilerde zeminleri sınıflandırması deprem hasarlarının azaltılması açısından çok önemli bir işlev görmektedir. En çok kullanılan zemin sınıflama parametresi 30 metre zemin derinliğindeki ortalama kesme dalga hızı ( $V_{s30}$ ) birçok deprem yönetmeliğinde etkin olarak kullanılmaktadır. Borchardt (1994) tepki spektrumlarından hesapladığı büyütme faktörleri ile  $V_{s30}$ 'ları ilişkilendirerek yeni bir deneysel ilişki ortaya koymuş ve deprem yönetmeliklerinde yer alan tasarım tepki spektrumları için birçok yönetmeliğe ışık tutacak sismik büyütme katsayılarını hesaplamıştır. Bu yüzden bu tez çalışmasında da, etkili bir dinamik parametre olan kesme dalgası temelli sınıflama ile periyodik bazlı sınıflama arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Kuvvetli yer hareketi azalım modelleri oluşturmak, zemin davranışlarını irdelemek, depreme dayanıklı yapı tasarımı ve zeminlere özel bina kod şartnameleri için güvenilir bir zemin sınıflaması oluşturmak son derece önemlidir. Kuvvetli bir yer hareketine karşı yerel bir zeminin dinamik tepkisini depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı için modellemek genelde güçtür. Bu sorunun üstesinden gelmek için NEHRP (Ulusal Deprem Zararlarını Azaltma Programı) ve Eurocode-8 gibi sismik tasarım yönetmelikleri oluşturularak zeminler kuvvetli yer hareketine benzer dinamik tepkiler gösterebilecek farklı sınıflara bölünmüştür (BSSC, 2003; CEN, 2003). Zemin sınıflamasına ilişkin daha önce niteliksel kapsamda yapılan ilk çalışmaları (Seed ve diğ., 1976; Dobry ve diğ., 1976; Joyner ve diğ., 1981) Borchardt (1994) nitel ve nicel zemin tanımlarını sentezleyerek yeni bir zemin sınıflaması öne sürerek zeminleri kesme dalgasının 30 metredeki ortalamalarına göre ve  $V_s$  (Kesme dalga hızı) bilgisinin olmadığı durumlarda da jeolojik ve jeoteknik bilgiye göre sınıflandırmıştır. NEHRP ve Eurocode-8 yönetmelikleri Borchardt'nın ortaya koyduğu zemin sınıflamasına göre geliştirildi. Bu sınıflamalara ek olarak daha detaylı jeoteknik kriterlere yer verildi. Örneğin Eurocode-8 zemin sınıflamasında, sahada uygulanan standart penetrasyon değerleri ve laboratuvarında uygulanan toplam gerilme analizlerinde kullanılan drenajsız kayma mukavemeti kriterleri ( $C_u$ ) ortaya konulmuştur. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TDBY, 2018) de bu kapsamda geliştirilmiştir.

Bir zeminin tepki karakteristikleri sığ tabaka özellikleri ile belirlenen zemin sınıflama sistemi ile yeterince temsil edilmeyebilir. Dolayısıyla daha derin tabakalar da zemin tepkisini etkileyebilir. Bu kapsamda da zemin hakim periyotları ve anakayaya olan derinlikler ile de ilgili çalışmalar ve sınıflamalar önerilmiştir (Livaoğlu H., 2017; Rodriguez-Marek ve diğ., 2001; Kim ve Yoon 2006). Bu bağlamda kuvvetli veya zayıf yer hareketi verilerini kullanarak HVSR yöntemi alternatif sınıflama prosedürleri için kullanılmaktadır (Zhao ve diğ., 2006; Phung ve diğ., 2006; Di Alessandro ve diğ., 2012). Yer ivme çalışmalarına ait ivme kayıtlarının eksikliğine bağlı mühendislik amaçlı başarılı simülasyonlar gerçekleştirilse de (Gibowicz ve diğ.; Boore 2003) deneysel (aletsel) veri daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretmede araştırmacıya olanak sağlamaktadır. Bunun yanısıra, özellikle son yıllarda simülasyon yöntemlerine ait gelişmeler, aletsel yöntemlerle kıyaslamada ve güvenilirliği sağlamada dikkate değer sonuçlar ortaya çıkarmıştır (Cheng ve diğ., 2020; Cox ve diğ., 2020; Molnar ve diğ., 2020). Bu bağlamda, sismik olarak aktif fakat iyi izlenemeyen bölgelerde üzerinden sentetik deprem kayıtları üretilerek duyarlılık analizleri ile kaynak parametreleri test edilebilmektedir (Askan ve diğ., 2013). Ayrıca mobil aletsel ölçümlere dayalı analizler ile sabit kurulu istasyonlara katkı amacıyla sediman kalınlıkları ve yer hasar görülebilirlik indeksleri kestirilebilir (Livaoğlu ve diğ., 2019).

Ülkemiz de Alp-Himalaya orojenik kuşağının en aktif zonlarında bulunması sebebiyle yüksek sismik aktiviteye maruz kalmaktadır. Maruz kalınan sismik aktivite bazen büyük depremler üretip yıkıcı hasar ve kayıplara yol açmaktadır. Türkiye, dünyada, Avrupa özelinde, İtalya'dan sonra istasyon sayılarınca ve verilere ulaşma birliği bakımından en etkin deprem istasyon ağına sahip ülkedir. 1970'lerden bu yana deprem istasyon sayısını ve etkinliğini artıran Türkiye, 2021 itibarıyla AFAD ve Kandilli rasathanesinin işlettiği toplam 1500'e yakın hız ve ivmeölçerlerden oluşan istasyonlara sahiptir. Bu çalışmada AFAD kuvvetli yer hareketi ivme veri tabanına ait istasyonlarda kaydedilen depremlerin incelenmesi ile istasyonların zemin sınıflandırılmasına ilişkin kestirimler ve yeni bir yaklaşım sunulması amaçlanmıştır. Küresel ölçekte özellikle Japonya, Hindistan Çin ve İran istasyon ağlarında 2010'larda başlayıp süren zemin sınıflama çalışmaları bu çalışmayı şekillendirmiştir.

Tezin giriş bölümünde konu ile ilgili bilgi kaynaklarında yer alan çalışmalar derlenmiş ve tezin amacı aktarılmaya çalışılmıştır.

Birinci bölümde, sismik yer hareketi, deprem yer hareketi ve deprem dalga fazlarının özellikleri incelenmiş olup yer hareketinin frekans özellikleri özgün örnekler ile derlenmiştir.

İkinci bölümde, zeminlerin büyütme potansiyelleri başlığı altında, yerel zemin özelliklerinin tanımlayan parametreler, transfer özellikleri ve zemin tepki analizlerine etki eden durumlar detaylı bir şekilde teorik ve deneysel (aletsel) çerçevede incelenip örneklerle birlikte açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, zemin sınıflamalarının amacı, zemin sınıflama şemaları, dünyadan örnekler ve deprem-bina yönetmeliklerindeki yerleri hakkında kapsamlı bilgiler verilerek Türkiye Kuvvetli yer hareketi istasyonları hangi şemalara denk düşmekte ve ne tür öneriler ile yeni bir sınıflamaya tabi tutulabileceği derlenmiştir.

Dördüncü bölümde, büyük bir veri tabanı olan Türkiye Ulusal Kuvvetli yer Hareketi ivme veri tabanından (TR-KYH) depremlerin elde edilmesi ve bu veri formatının dosyalarda istiflenip işleme sokulması için gereken eleme kriterleri MATLAB tabanlı bir program yazılarak sürecin daha az zaman alması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca incelenecek verilerin zaman ve frekans ortamı analizleri ve veri işlem süreçleri kapsamlı bir şekilde derlenmiştir.

Beşinci bölümde, tepki spektrum oranları ve Fourier spektrum oranlarına ilişkin sahadan çalışmalar sunulmuş, karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçları değerlendirilerek tezde hangi yöntemin kullanılacağı kararlaştırılmıştır. Farklı ve aynı depremlerin istasyonlardaki tepkilerinin spektral şekiller üzerinde etkisi araştırılmıştır. Tüm depremlerin analizi sonucu ortalama spektral şekiller elde edilmiş ve zemin baskın periyot aralıkları önerilmiştir. Kesme dalga hızına bağlı konvansiyonel sismik zemin sınıflamalarının avantaj ve dezavantajları incelenerek zemin baskın periyotlarına dayalı sismik zemin sınıflamasının sismik tehlike analizlerinde neden daha kullanışlı olabileceği derlenmiştir.

Altıncı bölümde, sismik zemin sınıflamasında tek bir parametreye bağılı kalmaksızın (baskın periyot) ortalama spektral şekillerin benzerliğine dayalı analizler gerçekleştirilip zemin sınıflamak için uyum kriterleri ve zemin baskın periyot aralıkları kestirilerek bir indeks önerilmiş ve yeni bir sismik zemin sınıflama yöntemi sunularak zemin sınıf belirlemeleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise, doktora tez çalışmasında elde edilen nihai sonuçlar tablo halinde sergilenmiş ve önerilere yer verilmiştir. Ekler kısmında da çalışma süresince hesaplamalara ilişkin yazılan ve derlenen tüm Matlab program ve fonksiyonları sunulmuştur. Şekil E1'de tüm bu süreci özetleyen akış şeması sergilenmektedir.





## 1. SİSMİK YER HAREKETİ VERİSİ

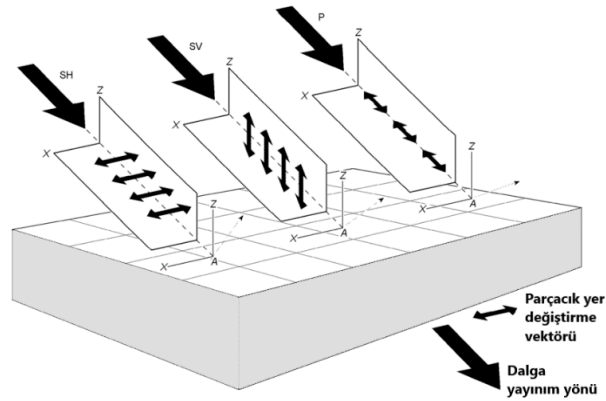
Gözlemlenmek istenen sismik sinyalden bağımsız olarak yer hareketinin aletsel kayıtlara her zaman belirli düzeylerde sismik gürültü içermektedir. Bu da yerin gerçek anlamda durağan olmadığına işaret etmektedir. Bu bölümde çevresel kaynaklı sismik gürültüden (mikrotremor) farklı olarak deprem kaynaklı sismik veriler irdelenecektir.

### 1.1. Depremler Ve Sismik Dalgalar

Depremlerin çoğu yer yüzeyinin 5 ile 30 km derinliklerinde kırılğan yapıların makaslanması veya tektonik levhalar boyunca sürtünmeli kaymalar nedeniyle kayaçlarda biriken gerilme, elastik limitler aşıldığında gerçekleşmektedir. Yaklaşık %30'u 70 km altında olan bu depremlerin %8'i de 300 km altında meydana gelmektedir. Bitişik levhalara ait jeolojik yapılar arasındaki bağlantılar, deformasyon kapasitelerini aşan malzeme özelliklerine bağlı olarak gerildiğinde yırtılarak sarsıntılı bir yer değiştirme açığı çıkartır. Sonrasında oluşan fay yırtığı bazı durumlarda jeolojik ana kayadan yüzeye kadar bile yayılabilir. Bir fay üzerinde meydana gelen bu yer değiştirmeler iki levha arasındaki gerilmenin durumuna bağlıdır. Yırtılma ilerlerken fayın aktif kısmı boyunca biriken gerilme enerjisi ardışık olarak boşalır. Yırtılan fay segmentinin uzunluğu tetiklenen depremin süresini belirler. Böylece, fayın her bir noktası, yırtılma ilerlemesinin hızına bağlı olarak belirli zaman gecikmeleriyle sismik dalgaların şeklini oluşturur ve sismogramlarda gözlenen dalga trenlerini resmeder.

Sismik dalgalar yayılım yolları boyunca yeraltında elastik deformasyona neden olurlar. Burada elastik terimi, gerilmenin ortadan kalkmasıyla deformasyonun yitirilmesine işaret etmektedir. Arama sismolojisinde, katı yer içi tabakaları boyunca seyahat eden sıkışma ve kesme dalgalarıyla ilgilenilir ki; dolayısıyla cisim dalgaları olarak adlandırılırlar. Mühendislik sismolojisi göz önünde bulundurulduğunda, serbest yüzey boyunca seyahat eden yüzey dalgalarının özellikleri incelenir. Özellikle, kesme dalgalarının girişiyle oluşan Love dalgaları mühendislik sismolojisinde salınımın

zarar verebilecek süresini ve frekans içeriğini belirlemede önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, deprem dalgaları (sismik dalgalar) genel olarak cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere ikiye ayrılır. Cisim dalgalarından P (birincil, gerilme-sıkışma dalgası) dalga yayılım doğrultusunda hareket eden parçacıkların çekme ve sıkışma deformasyonu ile temsil edilirken, S (sekonder, kesme dalgası) yayılım doğrultusuna dik bir şekilde hareket eden parçacıkların kesme deformasyonu oluşumu ile temsil edilir. S dalgası aynı zamanda yatay (SH) ve düşey (SV) düzlemlerde de hareket eder. P ve S dalga formlarında yayılan sismik enerji serbest yüzeye ulaştığında girişime uğrayarak Rayleigh (Rg) yüzey dalgalarını meydana getirir. Eğer cisim dalgaları yüzey altı derinliklerinde bir süreksizlikle girişime uğrarsa Love yüzey dalgası (Lg) meydana gelir. Her ikisi de merkez üssüne belirli uzaklıklarda konuşlanmış alıcılarda gözlemlenebilir. Lg dalgalarına maruz kalan yer malzemesinin parçacık hareketi SH dalgalarınıninkine benzer yatay düzlemde enine bir hareket sergilerken, Rg ise uzunlamasına devirsel bir hareket sergiler. Sismogramlarda, uzak depremlerde sediman kalınlıklarına bağlı olarak yüzey dalgalarının doğrudan gelen fazları ile geç gelen benzer yüksek genliklerdeki fazları da gözlemlenebilir. Tablo 1.1’de dört farklı sismik dalga çeşidinin özellikleri verilmektedir. Şekil 1.1.’de sismik dalga yayılım karakteristiğini oluşturan üç temel dalga tipinin (P, SH ve SV) hedef malzemede yayılım doğrultuları ve parçacık hareket yer değiştirme vektörleri gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Analizlerde kullanılan ve/veya elenen elastik dalgaların yayılma ve parçacık hareket yönleri (Holstein, 2007)

Tablo 1.1 Sismik dalga türleri ve genlik-frekans özellikleri Dalga hızları yukardan aşağıya doru azalmaktadır.

<b>Tür</b>	<b>Çeşit</b>	<b>Özellikler</b> <b>(Genlik-Frekans)</b>	<b>Frekans</b> <b>Aralıkları</b>
Cisim Dalgaları	P dalgası	-Eksenel (normal) gerilme -Düşük Genlikler -Yüksek Frekanslar -Düşey bileşen	0.1-50 Hz (0.02-10 s)
	S dalgası	-Kesme gerilimi -Artan Genliklerde -Düşük frekanslar -Yatay Bileşenler	
Yüzey Dalgaları	Lg Dalgası	-Azalan kesme dalgaları -daha yüksek genlikler -daha alçak frekanslar -Enine bileşen	0,003-10 Hz (0.1-350 s)
	Rg Dalgası	-Gerilme ve basınç dalgaları -Derinlikle azalan yüksek genlikler -düşey bileşen	

Belirtilen tüm dalga türleri yeraltının yoğunluk ve sıklık özelliklerine bağlı olarak farklı yayılma hızları gösterirler. Yoğunluk ve sıklık malzemenin özelliklerine göre her zaman doğru orantılı olmayabilir ve dalga yayılım hızlarını farklı şekillerde etkileyebilir. Örneğin daha az yoğun fakat sıklığı fazla olan gliserinde akustik dalga hızı 1900 m/sn iken daha yoğun fakat daha az sıklığa sahip süngerimsi kauçuk 1600

m/sn'dir. Sıklık ve yoğunluk ilişkilerini dalga hızları formunda beraber yansıtan bir parametre olan poisson oranı ( $\nu$ ) da malzemenin enine kısılmasının boyuna uzamasını oranı şeklinde ifade edilebilir ve dalga hızlarının yayılımında etken boyutsuz nicel bir özelliktir.

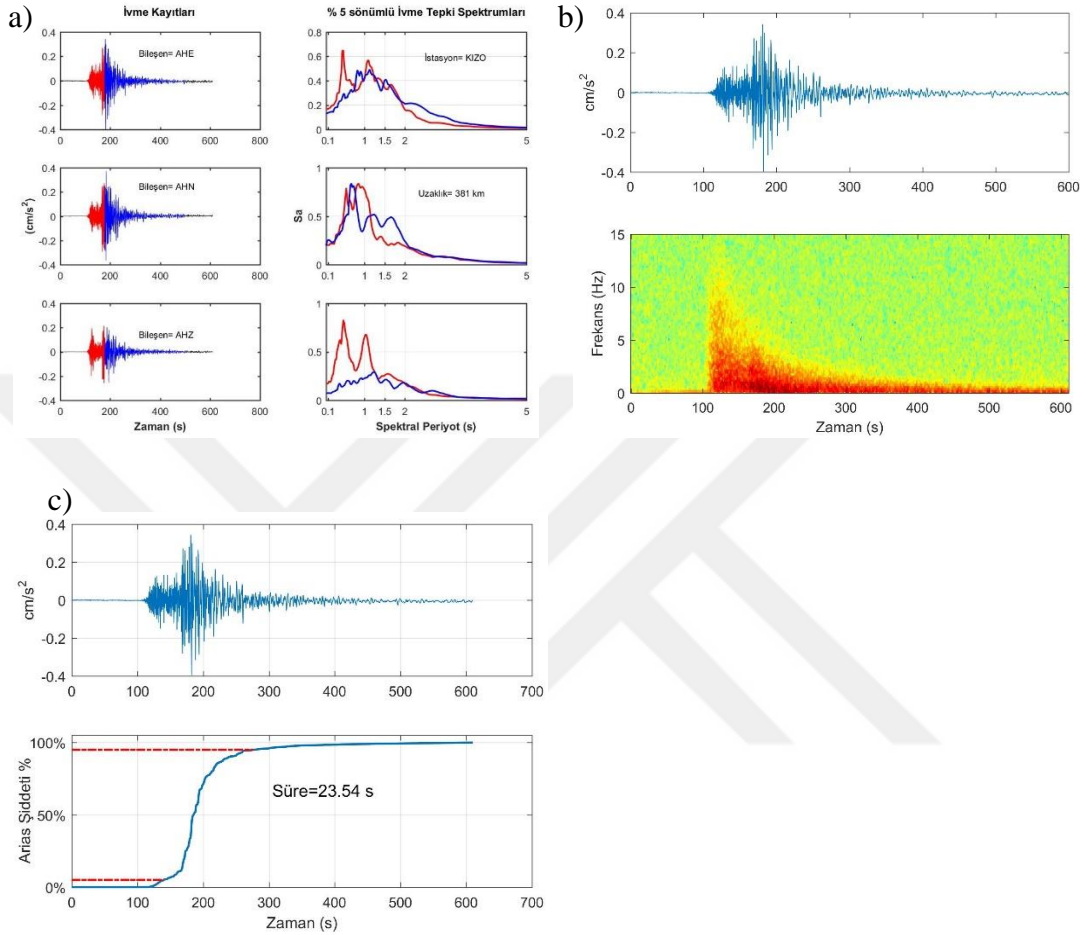
## 1.2. Deprem Yer Hareketi

Deprem yer hareketi olarak adlandırılan bir depremin etkisi herhangi bir sahada farklılıklar gösterir. Depremlere ait aletsel kayıtlar, ivme, hız ve yer değiştirme zaman serileri ile tasniflenir. Bir depremin yer hareketi üç temel özellik ile nitelendirilebilir. Bunlar; sarsıntının düzeyi, frekans içeriği ve süresidir.

Zemin tepki analizlerinde, özellikle spektral özellikleri etkileyen deprem yer hareketinin frekans içeriği özel bir yer teşkil etmektedir. Depreme maruz kalan bir sahada sarsıntının şiddet düzeyi depremin büyüklüğüne, kaynağa olan uzaklığına ve yerel zemin koşullarına bağlıdır. Bunların tümü deprem yer hareketinin frekans içeriği üzerinde etkiye sahiptir. Bilindiği gibi yer sarsıntı süresi uzadıkça yapının sünekliği azalır ve deprem süresince potansiyel yapısal hasara neden olabilecek durum ortaya çıkar. Yerel zemin koşulları nazarında bakıldığında ise, aynı depreme ve uzaklığa ait yer sarsıntı süresi gevşek zeminlerde sıkı ve/veya kaya zeminlere göre daha uzun olacaktır. Dolayısıyla potansiyel zararın da daha fazla görülebileceği aşıkardır. Bu kapsamda, 28 Ocak 2020 Erzincan depreminin sarsıntı süresi ve farklı fazların spektral özellikler üzerinde etkisi incelenmiştir. Nispeten uzak istasyon kaydı incelenerek tüm bileşenlere ait farklı fazların tepki spektrumları hesaplanarak Şekil 1.2.a'de gösterilmiştir. Enerjinin yoğunlaştığı S dalga treninde (Şekil 1.2.b) sarsıntı süresinin de yaklaşık 25 s. olduğu görülmektedir. Arias Şiddeti yaklaşımıyla hesaplandığında da (URL-1) sarsıntı süresi 23,5 s. olarak belirlenmiştir (Şekil 1.2.c).

Farklı deprem fazlarının dikkate alınarak hesaplandığı %5 sönümlü tepki spektrumlarında yatay bileşenlerde belirgin olmayan farklar tespit edilmekle beraber düşey bileşende S dalga fazından sonra belirgin bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Daha düşük genliklerde gelen S fazı sonrası girişimler spektral ivmelerdeki farklılığın nedenidir.

Dolayısıyla sarsıntı süresi ve spektral ivmelerin hesaplanmasında dalga fazı seçimi önem arz etmektedir. Zaten, Şekil 1.2.b’de de yatay bileşen spektrogramı irdelenip enerjinin ilk gelen P ve sonrasında gelen S dalga treninde yoğunlaştığı görülmektedir.



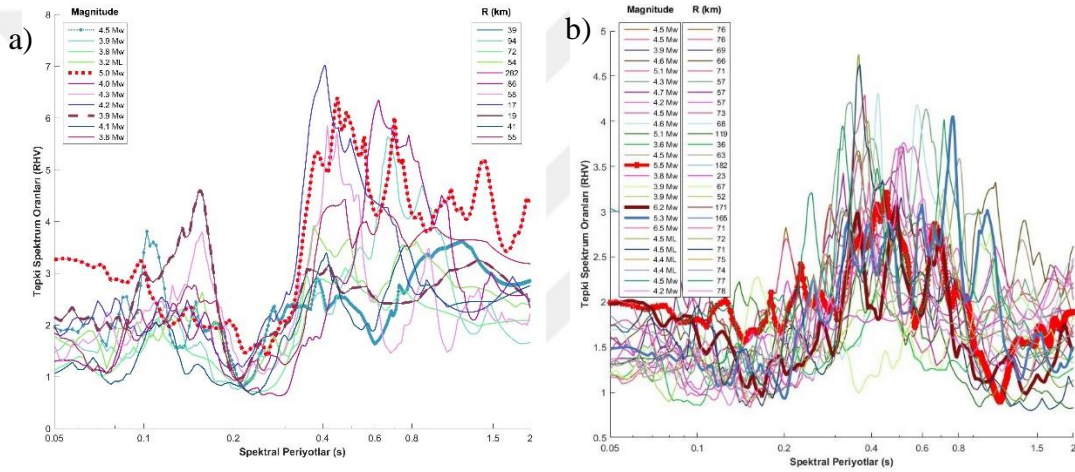
Şekil.1.2.a) 2020 Erzincan depremi (6.8 Mw) KIZO istasyonuna ait veri işlem geçirmiş ivme kayıtları ve spektrumları. b) Depremi Doğu-Batı bileşenine ait spektrogram. c) Deprem sarsıntı süresi.

### 1.3. Deprem Yer Hareketinin Frekans Özellikleri

Bir deprem yer hareketinin frekans özelliklerini belirleyebilmek için sismik verinin zaman ortamından frekans ortamına dönüşümü sağlanmalıdır. Bu dönüşümlerden en çok kullanılanlar sismik dalga formunu sinüs ve kosinüs fonksiyonları şeklinde modelleyen Fourier genlik spektrumları ve dalga hareket denkleminin sayısal integrasyon çözümüne dayanan elastik tepki spektrumlarıdır. Deprem yer hareketinin frekans özelliklerine, depremin büyüklüğü ( $M$ ), sismik kaynağa olan uzaklık ( $R$ ) ve

ilgili sahanın zemin özellikleri doğrudan etki eder. Bu temel etkenlerden türetilen en yüksek yer ivmesi, yerel salınım şiddeti de ikincil etken parametreler olarak söylenebilir. En doğru sonuçları elde etmek için, her etken parametrenin diğerlerinden bağımsız ve değerlerini koruyarak analiz edilmelidir. Örneğin, deprem büyüklüğünün frekans özellikleri üzerindeki etkisi aynı sahada ve uzaklıkta kayıtlar kullanılarak açığa çıkartılmalıdır.

Büyüklik ( $M$ ) ve uzaklık ( $R$ ) etkileri farklı jeolojik birimler üzerinde kurulu iki ayrı istasyonda kaydedilen 37 depremin elastik tepki spektrum oranları hesaplanarak yapılan inceleme Şekil 1.3.'de resmedilmektedir.

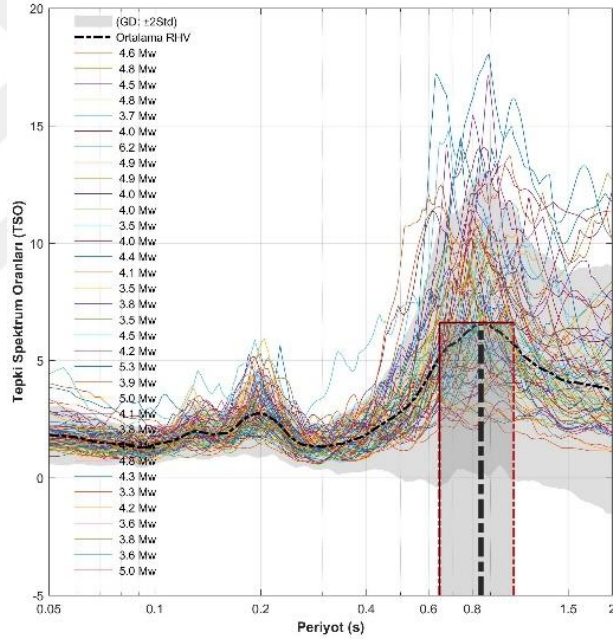


Şekil 1.3. a) 4130 (solda) ve 920 (b, sağda) istasyonlarında kaydedilen farklı deprem büyüklüklerinin spektral şekiller ve frekans özelliklerine etkisi.

Ayrıışmamış Kuvartener birimleri üzerinde orta-sıkı bir zemin üzerinde kurulu 4130 (Şekil 1.3.a) istasyonuna bakıldığında,  $R < 70$  km'de daha küçük büyüklüklerdeki depremlerin spektral büyütme oranları nispeten yüksek olup düşük baskın frekanslara (şekilde yüksek spektral baskın periyotlar) doğru bir eğilim görülmektedir. Metamorfik-Mermer birimi üzerinde kurulu 920 (Şekil 1.3b) kodlu istasyona bakıldığında da deprem büyüklük farklılıkları yakın veya uzak alanlarda spektral şekiller üzerinde etkisi yadsınabilir. Büyütmeler farklılıklar gösterse de genel spektral şekillerin karakterini koruduğu gözlemlenmektedir. Özetle burada büyük depremler uzak alanlarda kısa-periyot bandında olan baskın frekanslarda daha küçük büyütme oranları gösterebilirken orta-küçük depremlerin daha yüksek genlikli büyütme oranları gösterdiği

anlaşılmaktadır. Bunun nedenini Kramer (1996), sismik dalgaların faydan uzaklara hareketi sırasında yüksek frekans içeriklerinin düşük frekanslı içeriklere göre daha hızlı saçıldığı ve sönümlendiği üzerine bağlamıştır. Ayrıca belirtmek gerekir ki; büyük depremlerin (özellikle  $M > 6.5$ ) doğrusal olmayan davranışları da bu yaklaşımla incelenebilir fakat burada lineer olmayan durumlar üzerinde durulmamıştır.

Deprem yer hareketinin baskın periyoduna ilişkin en kapsamlı ve ilk çalışmalardan biri Tokyo'da Kanai (1983) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, her bir kayıt sahasının genliğinin en yüksek seviyeye ulaştığı noktalarda belirli baskın periyotlar gözlemlenmiştir. Bu çıkarımı destekleyecek bir örnek, düşük kesme dalga hızına sahip gevşek bir zeminde kurulu 3503 istasyonunun kaydedilen 40 depremin aynı zeminde nasıl davrandığını gösteren Şekil 1.4'de sergilenmektedir.



Şekil 1.4. 3503 kodlu istasyonda kaydedilen depremlerin tepki spektrum oranları. Renkli eğriler her bir depreme ait eğrileri temsil ederken gri gölgeler %95 güven aralıklı bölgeyi siyah kesikli çizgi etrafını satan dikdörtgen kırmızı gölge de baskın periyoda ait standart sapmayı temsil etmektedir.

Farklı büyüklüklerin (Mw 3-Mw 5) ve uzaklıkların ( $R < 150$  km) zemini hangi büyütme ve periyotlarda karakterize ettiği açıkça görülmektedir. Burada dikkat

edilmesi gereken özellik, deprem hareketinin baskın frekansı ile sahanın baskın frekansının farklı kavramlar olduğudur. Bu ikisi arasındaki ilişki kaynak, yol ve yerel zemin koşullarının belirlediği litolojik formasyonla matematiksel olarak konvolüsyon süreciyle bağlıdır. Deprem kaynak hareketinin kaynak ve yol etkileri giderilerek zemine ait baskın salınım periyotlarının ve büyütmeleri detaylı olarak Bölüm 2.3’de incelenecektir.





## 2. YEREL ZEMİNLERİN BÜYÜTME POTANSİYELLERİ

Mühendislik anakayasına örten sedimanter birimlerin ana kayadaki hareketi oluşturan her bir frekansa ait genliklerin büyütülmesi yahut küçültülmesine zeminin büyütme potansiyeli denir. Mühendislik sismolojisinin esas görevlerinden biri de kaydedilen yer hareketindeki kaynak ve yol etkilerini giderip zemin etkisini ortaya çıkarmaktır. Bu da genellikle bu süreçlerin zamandan bağımsız süzgeçler olduğu kabulü göz önüne alınarak gerçekleştirilir. Zemin etkisini belirlemede sayısal ve analitik çözümlerin gerçek yer hareketi verileriyle uyuşmaması su üç hususa bağlanabilir; 1. zemine ait yer altı kesit bilgileri, 2.yapıcı modellerin kısıtlamaları (inelastik gerilmelerin hesaba katılmaması) ve 3. dalga yayılım kabulleridir. Deneysel (aletsel) veriye dayalı transfer fonksiyonları hesabı ile bu sorunlar bir nebze aşılabılır. Bu bağlamda, tez kapsamında deneysel (aletsel) verilerin çokluğu sayesinde varılan sonuçların güvenilirliklerinin yüksek olması beklenmektedir. Parçacık hareketi ve yayılma yönü yatay düzlemde olan kesme dalgaları (SH) zemin ve yapı deformasyonuna neden olan deprem yükünün baskın biçimidir (Carcione J. M., 2001). Bundan dolayı tez kapsamında tüm kayıtlara ait dalga formlarından kesme dalgalarının koda kısımları dışarıda tutulup belirgin kesme dalga girişimleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

### 2.1.Yerel Zeminlerin Transfer Özellikleri

Zemin yüzeyindeki deprem hareketi ve mühendislik anakayasındaki hareket farklılığına yerel zeminlerin transfer özellikleri denir ve transfer fonksiyonu ( $TF$ ) ile ifade edilir. Bu farktan ileri gelen zemin büyütme potansiyeli, analitik (zemin modeline ait hesaplanan transfer fonksiyonu) veya deneysel (aletsel verilerin spektral olarak değerlendirilmesi ile elde edilen transfer fonksiyonu) yaklaşımlarla araştırılabilir (Bölüm 2.3). Analitik (teorik) yöntemler yeraltı stratigrafisi ve geoteknik parametreler hakkında detaylı bilgilere ihtiyaç duyarken deneysel yöntemler de sinyal-gürültü oranı yüksek sismik kayıtlara ihtiyaç duyar (Bölüm 2.2).

### 2.1.1. Zemini tanımlayan parametreler

Yeraltı zemin özellikleri sıklık, yoğunluk ve sönüm terimleriyle tanımlanabilir (Hampe ve diğ., 1990). Yoğunluk ( $\rho$ ), zemin sondajlarından elde edilen karot örneklerinin laboratuvar deney sonuçları ile belirlenebilirken mühendislik amaçlı uygulamalarda kullanılan sönüm ( $\xi$ ) de eşdeğer sönüm faktörü olarak sismik sinyalin uzaklıkla azalan enerji veya genlik özellikleri ile tanımlanabilir. Zemin malzemesinin sıklığı, nispeten düşük kesme gerilme ( $\gamma$ ) aralıklarında, elastisite ( $E$ ), kayma ( $G$ ) modülleri, P, S dalga hızları ve poisson oranı ( $\nu$ ) ile tanımlanabilir (Lang, D. H. (2004). Elastisite modülü, normal gerilmenin birim uzamaya oranı şeklinde ifade edilen elastik şekil değişiminin bir ölçütüdür. Kayma modülü, kesme deformasyonu altında malzemenin direncini ifade eder. Deneysel olarak kesme gerilmesinin ( $\tau$ ) kesme deformasyonuna ( $\gamma$ ) oranı ile ifade edilebilir. Boyutsuz bir ölçüt olan poisson oranı ( $\nu$ ) zemin malzemeleri ve kaya için 0,2 (kaya) ile 0,5 (suya doymun gevşek sedimanlar) değerleri arasında değişim gösterir. Zemini tanımlayan bu parametreler birbirleriyle ilişkilendirilebilir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Zemini tanımlayan parametrelerin birbirleriyle ilişkileri

Parametreler	Eşdeğer Eşitlikler			
	$G, \nu, \rho$	$E, G, \rho$	$E, \nu, \rho$	$\rho, v_p, v_s$
Elastisite Modülü $E$	$2 \cdot G \cdot (1 + \nu)$	-	-	$\rho \cdot v_s^2 \cdot \frac{3 \cdot v_p^2 - 4 \cdot v_s^2}{v_p^2 \cdot v_s^2}$
Kayma Modülü $G$	-	-	$\frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$	$\rho \cdot v_s^2$
P dalga hızı $v_p$	$\sqrt{\frac{G \cdot (2 - 2 \cdot \nu)}{\rho \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}}$	-	-	-
S dalga hızı $v_s$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}}$	-
Poisson oranı $\nu$	-	$\frac{E - 2 \cdot G}{2 \cdot G}$	-	$\frac{v_p^2 - 2 \cdot v_s^2}{2 \cdot (v_p^2 \cdot v_s^2)}$

Dinamik bir yükleme altında zemine ait deformasyon davranışının elde edilebilmesi için kayma ( $G$ ) ve elastisite ( $E$ ) modülleri ile sönüm ( $\xi$ ) parametreleri en önemlileridir. Kesme deformasyonun artmasıyla sönüm faktörü artarken kayma modülü azalır. Bu temel bilgiler mühendislik amaçlı uygulamalarda esası oluşturan yapıtaşlarını oluşturur ve kayma modülünün, gerilmelerle ve sönümle nasıl davranış sergilediği çeşitli zeminler ve dinamik kuvvetler için eşdeğer doğrusal değerlerle belirtilmiştir.

### **2.1.2. Zeminlerin model tabanlı nitelendirilmesi**

Yerel sahaların ve yeraltı koşullarının detaylı bilgisine bağlı olarak bir, iki veya üç boyutlu zemin modelleri oluşturulabilir. Bir boyutlu modellere dayalı yer tepki analizleri çoğu zaman ölçülen etkiyle uyumaktadır. İki ve üç boyutlu modeller çok geniş bir sondaj bilgi veri seti veya sismik arama yöntemleri gerektirdiğinden bir boyutlu analizler tercih edilmektedir.

Bir boyutlu yeraltı model profiller oluşturulurken tüm tabakaların yatay ve sonsuz uzandığı kabulü yapılır. Bir boyutlu analizlerde yüzey topoğrafyası ve homojensizlik etkileri dikkate alınmaz.

### **2.1.3. Zemin tepki analizlerine tesir eden durumlar**

Devamlı bahsedildiği gibi, zeminlerin transfer özellikleri veya büyütme potansiyelleri yalnız jeolojik durumdan etkilenmez, aynı zamanda yüzey ve yer altı topoğrafyasından ve kuvvetli yer hareketinden dolayı devirsel yüklemelerin sonucu oluşan doğrusal olmayan davranışlardan da etkilenir. Analitik yöntemlerin çoğu bu etkileri hesaba katamazken, olası etkileri bu alt başlıkta incelenecektir.

#### **2.1.3.1 Sedimanter zemin tabakalarının varlığı**

Mühendislik anakayasını örten bir veya daha fazla sedimanter zemin tabakalarının varlığı zemin büyütme etkisine yol açan ana sebeptir. Anakaya ve sedimanlar arasındaki empedans farkından dolayı sismik dalgaların tuzaklanması (trapping) dalga genliklerinin artmasına yol açar. Bu alt başlıkta, mühendislik anakayasını örten sediman kalınlıklarının sismik empedans farklılıklarının, kritik sönüm faktörünün ve

sismik hızlarının bir boyutlu transfer fonksiyon spektrumunu nasıl etkilediği irdelenmiştir.

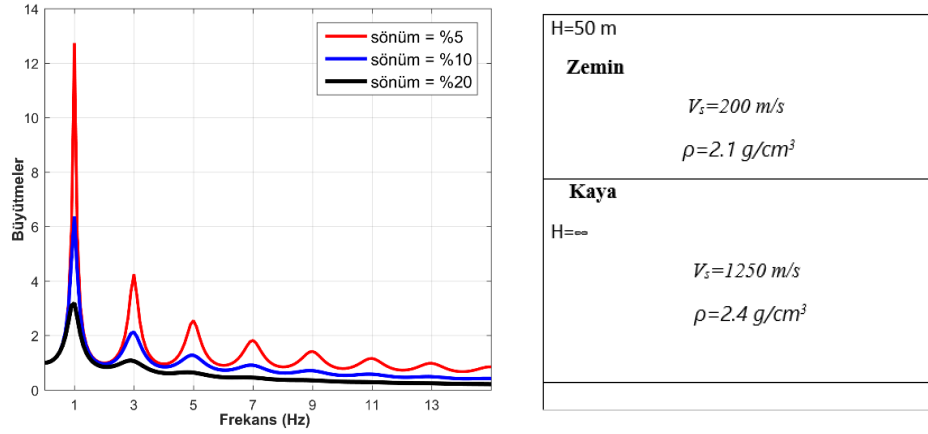
Her bir zemin tabakasına ait yoğunlukların ve kesme dalga hızlarının çarpımı o tabakanın empedansını ifade eder. Sismik empedans farkı ( $\alpha_z$ , oranı) Eşitlik 2.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha_z = \frac{\rho_r \cdot v_{S_r}}{\rho_s \cdot v_{S_s}} \quad (2.1)$$

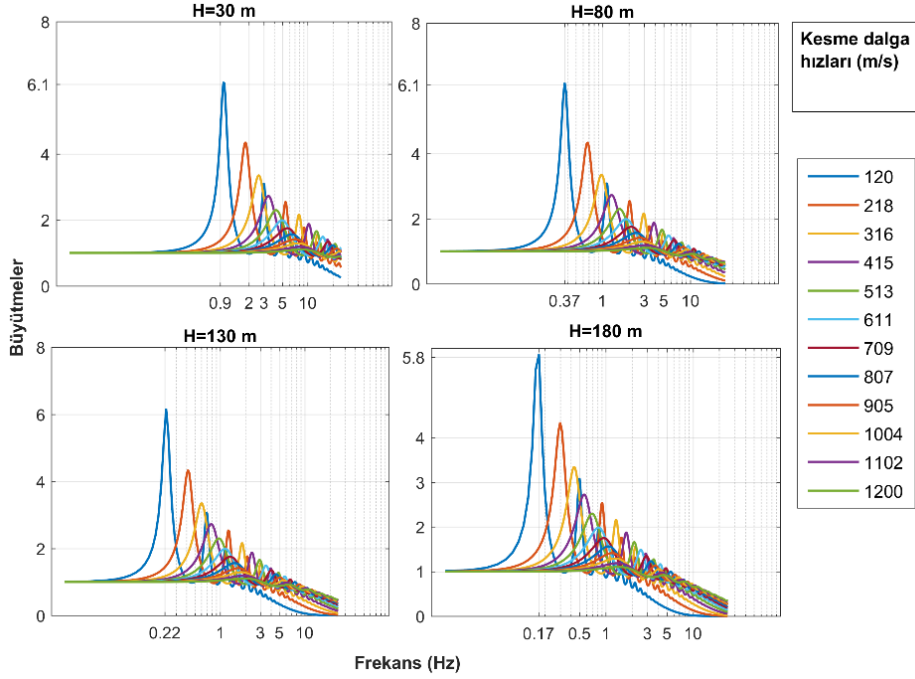
Burada  $\rho_r \cdot v_{S_r}$  anakayaya ait empedansı ifade ederken  $\rho_s \cdot v_{S_s}$  de sedimanter örtüye ait olanı ifade etmektedir. Tuzaklanan dalgalar arasındaki girişim frekans ortamında spektral piklerle nitelenen rezonans örüntülerine neden olur (Bard ve diğ., 1997). Yüksek genliklere ait rezonans frekansları tabaka kalınlıkları (H) ve dinamik zemin özelliklerine (özellikle kesme dalga hızı,  $v_s$ ) bağlıdır. i.inci rezonans frekansı:

$$f_i = (2 \cdot i + 1) \frac{v_s}{4H} \quad i = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (2.2)$$

Burada i' ler frekans harmoniklerini ifade eder. i=0 temel veya baskın frekans için hesaplanır. i>0 frekansları zemin baskın frekansının ( $f_s$ ) yüksek harmoniklerini ifade eder. Zemin sönüm faktör ( $\xi$ ) etkilerinin yüksek harmoniklerdeki frekanslarda oluşan büyütme tesiri düşük frekanstakilere oranla daha fazladır. Zemin hakim frekansı ( $f_s$ ) en büyük genliği oluşturmaktadır. Bu etkiyi incelemek üzere Şekil 2.1.'de bir boyutlu zemin modeli için elastik transfer fonksiyonları farklı sönümler için hesaplanmıştır. Spektral pikler Eşitlik 2.2'yi destekler nitelikte tekli frekanslarda görülmektedir. Şekil 2.2.'de sediman kalınlıklarının artmasıyla zemin baskın frekanslarının küçüldüğü gösterilmektedir. Farklı sismik hızların Transfer fonksiyonu etkileri incelendiğinde hızların artması ile büyütme azaldığı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Farklı kritik sönüm faktörlerinin yarı sonsuz mühendislik anakayasını örten homojen zemin tabakası üzerinde büyüme özelliklerine olan etkisi



Şekil 2.2. Farklı kesme dalga hızları ve kalınlıkların 1-B transfer fonksiyonu üzerinde etkileri

### 2.1.3.2. Zeminlerin doğrusal olmayan davranışları

Sismik dalgaların zemin tabakaları içinde yayılımı sürekli olarak bir miktar doğrusal olmayan malzeme davranışı içerir. Deformasyon gerilmesinin düşük seviyelerinde bile gerilmeye birlikte sönümün artması sıklığın azalmasına neden olur (Scawthorn ve diğ., 2002). Sönüm ( $\xi$ ) ve gerilme deformasyonu ( $\gamma$ ) arasında Eşitlik (2.3)'de belirtilen

ilişki vardır. Elastik olmayan bu davranışların tepki spektrumlarına etkisi daha çok 100 gal üzeri ivme değerlerinde devreye girer. Zeminlerin dinamik yüklemeler altında artan deprem ivmesi, kritik sönüm faktörünün artması ve düşük kesme dalga hızları durumunda doğrusal olmayan davranışlar ortaya çıkar (Thompson ve diğ., 2012; Beresnev ve diğ., 1996). Doğrusal olmayan davranışlar kohezyonsuz zeminlerde dikkate alınırken sıkı zeminlerde ihmal edilebilir.

$$\frac{\xi}{\xi_{maks}} = 1 - \frac{G}{G_{maks}} \quad (2.3)$$

Burada  $G_{maks}$  düşük gerilme deformasyonlardaki kesme gerilmesini ifade eder. Kuvvetli yer hareketi temelli analizlerde yanlış yorumlamalar dikkatli incelenerek ortadan kaldırılabilir. Gevşek zeminlerin doğrusal olmayan davranışları şunlara yol açabilir;

- Zemin baskın periyodunun düşük frekanslara kayması,
- Tüm periyot aralıklarına ait büyütme azalma,
- En yüksek yer ivmelerinde (EYİ) yüksek frekanslarda etkili sönüm faktörüyle birlikte azalma.

Doğrusal olmayan zemin tepki analizleri, kesme deformasyonlarıyla değişen sıklık ve sönümün ifade edildiği sayısal çözüm yaklaşımlarıyla yapılabilir. Doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinde eşdeğer-doğrusal model veya hareket denkleminin doğrusal olmayan değişken gerilme-yamulma çözümüne dayalı yöntemleri ihtiva eden bilindik bilgisayar programları sıkça kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı doğrusal olmayan dinamik analizler yapan programlar da mevcuttur.

Zayıf yer hareketi verilerinin analizi ile kuvvetli yer hareketinin neden olduğu doğrusal olmayan yer hareketi etkilerinin kestirilebilmesi ve aralarında karşılaştırmalı çalışmalar mevcuttur ve özellikle 0.3 g üzeri ivmelerde gevşek zeminlerde farklılıklar oluşabilmektedir (Boore, 2004; Bakır ve diğ., 2005; Su ve diğ., 1998). Farklı bilimsel çalışma ve görüşlerin yer aldığı spektral oran çalışmalarında (Bölüm 2.3) ise, zemin doğrusal olmayan davranışının etkisinin giderildiği düşünülmektedir. Örneğin

Theodulidis ve Bard (1995), yatay ve düşeyde oluşan hareketin karşılaştırılabilir olduğu, bu nedenle de zayıf ve kuvvetli yer hareketi verileri için nerdeyse ideal büyütme fonksiyonları oluşturduğunu söylemektedirler.

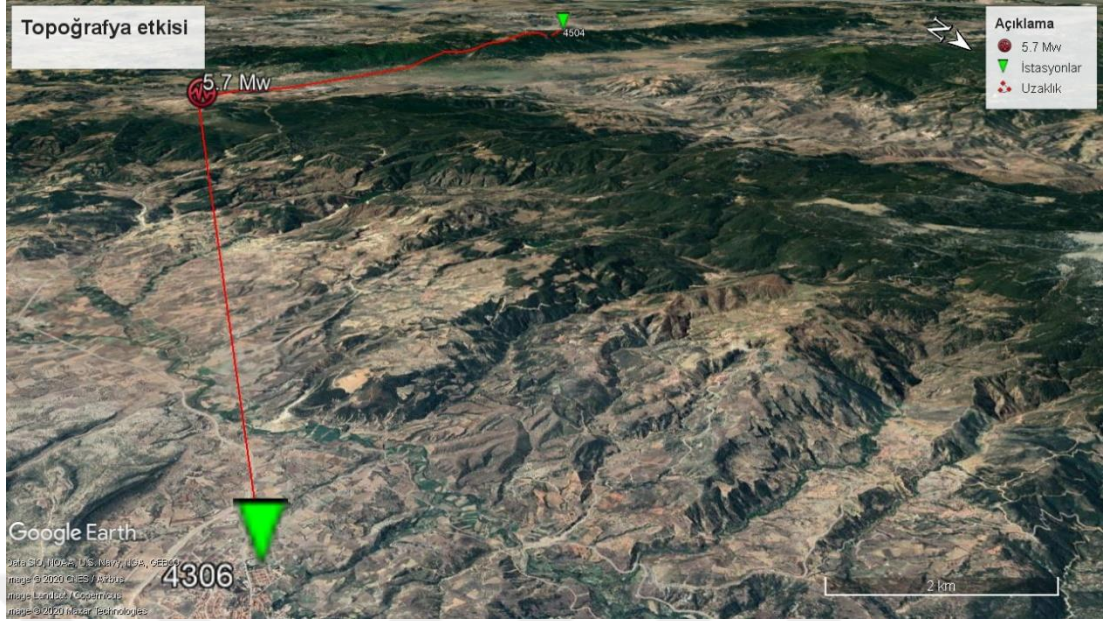
### 2.1.3.3. Topoğrafya Etkisi

Yüzey topoğrafyasının deprem yer hareketine ait frekans ve genlik özelliklerini etkilediği bilimsel çevreler tarafından yıllardır bilinmektedir. Bu etki, önce teorik (Gilbert ve Knopoff 1960; Hudson ve Knopoff 1967; Boore 1972) sonrasında ise aletsel veriler ve sayısal analizlerle irdelenmiştir (Geli et al. 1988; Paolucci, 2002; Kamalian et al. 2008; Pagliaroli ve diğ., 2015; Molina, S., ve diğ., 2019). Genel olarak iki çeşit topoğrafya etkisine dikkat edilmelidir:

- sarp zemin eğimlerinden ve kaya sırtlarından oluşan dağlık yüzey topoğrafyası,
- keskin havza geometrilerinden ve yanal süreksizliklerden oluşabilen yeraltı topoğrafyası. Sediman dolu eğimli havzalar cisim dalgalarını tutar ve bunların alüvyon içerisinde yüzey dalgası olarak yayılmasına yol açar. Böylece bu tip yeraltı geometrileri ve formasyonlar yer hareketi süresinin ve sarsıntı şiddetinin artmasına neden olur (Kramer, 1996).

6,9 Mw büyüklüğüne sahip 1980 İtalya (Irpinia) depremi ve 6.4 Mw büyüklüğündeki 2003 Bingöl depremlerine bakıldığında ağır hasan alan yapıların havza doğrultusunda uzanan sarp eğimli yamaçlarda meydana geldiği görülmektedir. Yüzey topoğrafyasının sismik büyütme neden olduğu bu durumlarda topoğrafyaya ait açıklık açısı etkin rol oynamaktadır. Açıklık açısı ve topoğrafik geometrinin dalga boyuyla örtüştüğü durumlarda gelen S dalgası genliklerinde daha fazla büyütme belirlenmiştir (Akı, 1988; Bard, 1997; Athanasopoulos ve diğ., 1998). Bu nedenle bazı deprem yönetmelikleri (French earthquake code AFPS, 1990) topoğrafya etkilerini depreme dayanaklı bina tasarımı kapsamında dikkate almaktadır.

19.05.2011, 23.15 tarih ve saatinde Kütahya'nın Simav ilçesinde meydana gelen 5.7 Ml büyüklüğünde ve 24 km derinlikli depreme ait analiz edilen istasyonlar Şekil 2.3'de gösterilmektedir.

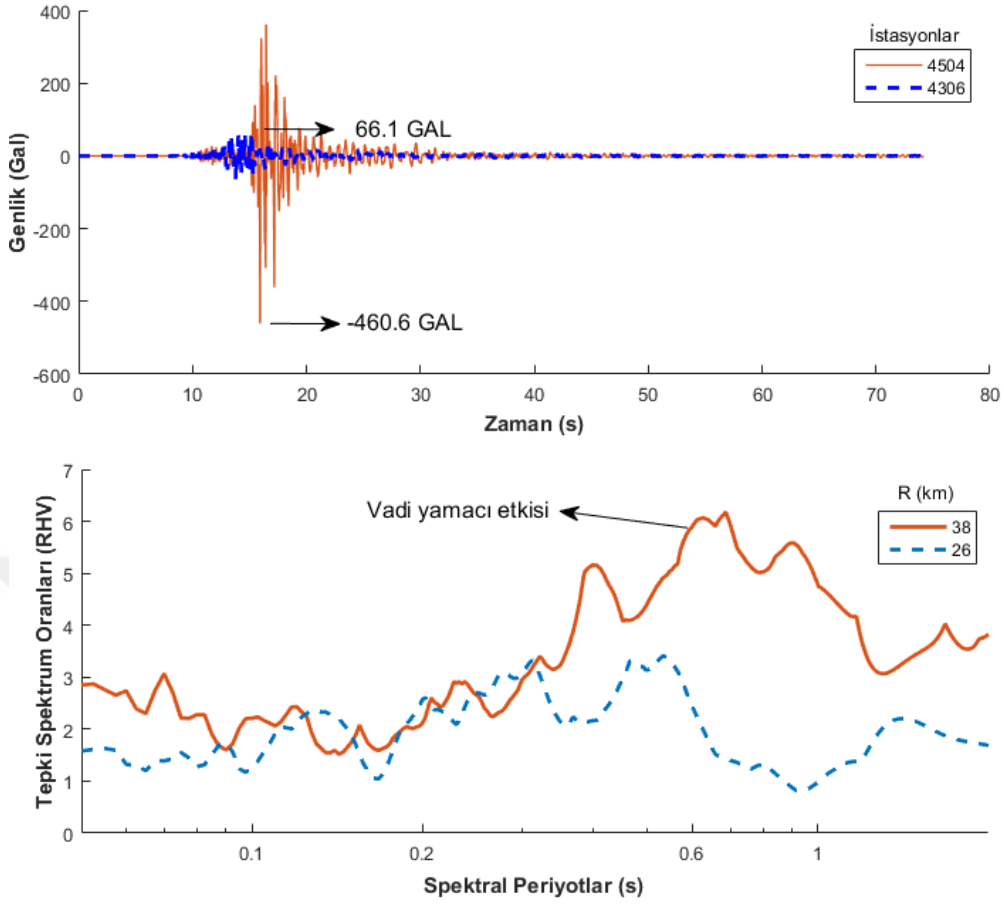


Şekil 2.3. 5,7 büyüklüğündeki Simav depremi analizi yapılan çevreleyen istasyonlara ait uydu üç boyutlu düzlemde uydu görüntüsü.

Şekil 2.4’de benzer zemin sınıflarında ve yakın alan uzaklıklarda (26-38 km) küçük ölçekte bile yerel zemin etkisine örnek temsil etmek amacıyla gerçek bir olay üzerinden gidilerek 4306 ve 4504 kodlu istasyonlara ait ivme zaman grafikleri ve tepki spektrum oran çözümleri sunulmuştur.

Orta miyosen yaşlı karasal karbonatlar üzerinde kurulu sırasıyla 304 ve 336 m/sn  $V_{s30}$ ’lara sahip iki farklı istasyonda 4504 koldu istasyonun ivmeyi 66 Gal’den 460 Gal’e büyüttüğü görülmektedir. Buradaki durum direk topoğrafıyla ilişkilendirilebilir ki keza zaten 4504 nolu istasyonda da vadi yamacında kuruludur. %5 sönümlü tepki spektrum oranları da incelendiğinde 0,6 sn’lik baskın periyotta büyütmenin 4306 nolu istasyona oranla yaklaşık iki kat daha yüksek olduğu saptanmıştır.





Şekil 2.4. Simav depremi (5.7)'nin farklı iki istasyondaki ivme kayıtları (üs) ve %5 sönümlü tepki spektrum oranları (altta).

## 2.2. Transfer Fonksiyonunu Elde Etmede Analitik (Teorik) Yöntemler

Zemin tepki analizlerinin teorik altyapısı 1970'lerde oturtulmuş, yenilikler daha çok sayısal çözüm algoritmalarında çok boyutlu ve sonlu elemanlar nazarında geliştirilmiştir. Bir boyutlu teorik transfer fonksiyonu hesaplamalarında, anakaya ve yüzeyde düşey yönde yayılan yatay doğrultuda polarize olmuş  $S_H$  dalga hareketinin genlikleri Fourier serisinin üstel gösterimine dayalı hareket denklemine doğrusal yaklaşımla elde edilir. İki ve üç boyutlu sonlu elemanlara dayalı sayısal yaklaşımlarda ise hareket denklemi her bir eleman için zaman ortamında yinelemeli (iteratif) bir şekilde sayısal olarak çözümlenerek yüzeydeki yer değiştirmeler elde edilir.

Artan zemin veri bilgisi ve işlemci hızlarıyla analizlerin doğruluğu ve hesaplama süresi de kısalmıştır. Buna rağmen, bir boyutlu teorik hesaplamalar temel girdi olarak halen kullanılmakta ve ciddi fikirler sunmaya devam etmekle beraber artan kayıt kalitesi ve aletsel yaklaşımlar da daha hızlı ve güvenilir sonuçlar üretmeye mahirdir.

Teorik zemin tepki kestirim yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu şu detaylı bilgilere bağlıdır:

- zemin tabakalarının ve toplam sediman kalınlığı ve ana kayaya olan uzaklıkları da kapsayan yeraltı stratigrafisi,
- zemin malzemesine ait Geoteknik özellikler (mekanik ve dinamik parametreler).

Bununla birlikte, hesaplanan sonuçların güvenilirliği başka yöntemlerle, özellikle farklı tipte aletsel kayıtların kullanılmasıyla artar. İzleyen alt bölümlerde frekans-bağımlı bir boyutlu zemin modeline göre transfer fonksiyonları ve teorik spektral oran yöntemi irdelenecektir.

### **2.2.1. Bir Boyutlu Yer Altı Profiline Ait Teorik Transfer Fonksiyonu**

Transfer fonksiyonu, yer altı zemin profillerini oluşturan jeolojik stratigrafi (zemin tabaka kalınlıkları,  $H$ ), mekanik özellikler ( $\rho$ ,  $\nu$ ) veya dinamik parametrelerin ( $E_{dyn}$ ,  $G_{dyn}$ ,  $\nu_p$ ,  $\nu_s$ ) oluşturduğu rezonans özelliklerini tanımlar. Sediman tabakalar içinde seyahat eden dalgaların tabaka sınırlarının ve zemin malzemesinin transfer süreçlerine bağlı olarak frekans ve genlik içeriklerinde değişiklikler meydana gelir.

Teorik transfer fonksiyonu yerel zemin koşullarına göre harmonik parçacık hareket genliklerinin ne ölçüde büyütüldüğü hakkında bilgi verir. Hesaplanan bir boyutlu transfer fonksiyonları aşağıdaki kabulleri öngörür (Elton ve Martin II, 1989; Kramer, 1996; Mayer-Rosa ve Jiménez, 2000):

- sonsuz uzanan yatay tabakalanmış türdeş ve eş yönlü tabaka modelleri,
- yüzey topoğrafyasından gelebilecek etkilerin yok sayılması,

-zemin davranışı ve baskın periyodunu en çok etkileyen düşey yönde yayılan düzlem  $S_H$  dalga kabulü,

-her bir zemin tabakasının kendi kalınlık, kayma modülü, yoğunluk ve sönüm faktörü ile tanımlanması.

Ayrıca  $S_H$  dalgalarının keskin rezonans frekansları üretmelerini ana kayadaki dinamik kaynağa ve sediman tabakalar arasındaki yüksek hız kontrastına bağlayan Van Der Baan, M. (2009), çalışmasında deprem veya gürültü kaynaklı  $S_H$  fazlarının bu mekanizmayla uzaktan bağımsız rezonans frekanslarını üretmede mahir olduğunu göstermiştir.

İzleyen alt bölümde elastik anakaya üzerinde çok tabakalı zemin transfer fonksiyonun teorik çözümleri ve Matlab tabanlı bir program üzerinden hesaplanması üzerinde durulacaktır.

#### **2.2.1.1. Elastik ana kaya üzerinde sönümlü çoklu zemin tabakaları**

Bir boyutlu dalga denkleminin kısmi diferansiyel denklem formu Eşitlik (2.4)'de ki gibi ifade edilmektedir (Feynman ve diğ., 2011):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

Burada,  $v$  dalga ilgilenilen kesme dalga yayılım hızını belirtmektedir. Bu denklemin çözümüne ilişkin biçim Eşitlik (2.5)'deki gibidir,

$$u(x, t) = f(vt - x) + g(vt + x) \quad (2.5)$$

Burada,  $f$  ve  $g$  Eşitlik (2.4)'ü sağlayan gelişigüzel fonksiyonlardır. Eşitlik ayrıca pozitif ve negatif yönlerde  $v$  hızıyla ilerleyen dalgaların zaman ve konumdan bağımsız olduğu söylenebilir.

Durumu resmetmek için, bir çubuğun kararlı harmonik bir gerilmeye maruz kalması durumunda  $(\sigma(t)) = \sigma_0 \cos \omega t$ ,  $\sigma_0$ , dalga genliği,  $\omega$ =uygulanan yükün açısal frekansı)

çözüm dalga sayısı ( $k=w/v$ ) biçiminde Eşitlik (2.6)'daki haliyle ifade edilir (Tsai, 1970; Kramer,1996);

$$u(x, t) = A\cos(\omega t - kx) + B(\omega t + kx) \quad (2.6)$$

Pozitif x-yönünde dalga yayılımı için ( $B=0$ ),  $u(x,t)$  fonksiyonun yol ve zamana göre ayrı ayrı ikinci türevleri alınıp dalga denkleminde (Eşitlik 2.4) yerine konulduğunda Eşitlik (2.7) elde edilir.

$$-\omega^2 A\cos(\omega t - kx) = -v^2 k^2 A\cos(\omega t - kx) \quad (2.7)$$

Denklem sayısal hesaplama kolaylığı için Karmaşık sayıların notasyonunu kullanarak eksponansiyel bir şekilde ifade edilebilir. Fourier serileri şeklinde tanımlanabilen periyodik bir yüklemenin eksponansiyel gösterimi Eşitlik (2.8)'deki gibi ifade edilir:

$$Q(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q_n^* e^{-i\omega_n t} \quad (2.8)$$

Burada  $q_n^*$  karmaşık Fourier katsayılarını ifade etmektedir.  $n$ . harmonik tarafından yüklenen tek serbestlik dereceli bir sistemin (TSD) tepkisi hareket denklemleri ile Eşitlik (2.9)'daki gibidir:

$$m\ddot{u}_n(t) + c\dot{u}_n(t) + ku_n(t) = q_n^* e^{-i\omega_n t} \quad (2.9)$$

Klasik hareket denkleminin periyodik bir yüklemeye tepkisini ifade eden Eşitlik (2.9)'da,  $\ddot{u}_n$  yer ivmesi,  $\dot{u}_n$  hızı ve  $u_n$  de  $n$ .harmoniklere ait yer değiştirmelerin zamanın fonksiyonu olarak belirtmektedir. Burada  $m$  kütleyi,  $c$  sönümü  $k$  ise katılığı göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafı periyodik yüklemeyi ifade eden  $\omega_n$  açısal frekansları belirtmektedir.

Yer değiştirmeler ( $u_n$ ) yüklemeyi kontrol eden transfer fonksiyonu şeklinde Eşitlik (2.10)'deki gibi ifade edilebilir.

$$u_n(t) = H(\omega_n) q_n^* e^{-i\omega_n t} \quad (2.10)$$

Burada,  $H(\omega_n)$  sistemin salınımına ait yer değiştirme anlamına gelen transfer fonksiyonudur. Eşitlik (2.10) hareket denkleminde (2.9) yerine konulduğunda transfer fonksiyonu Eşitlik (2.11)'deki gibi olur:

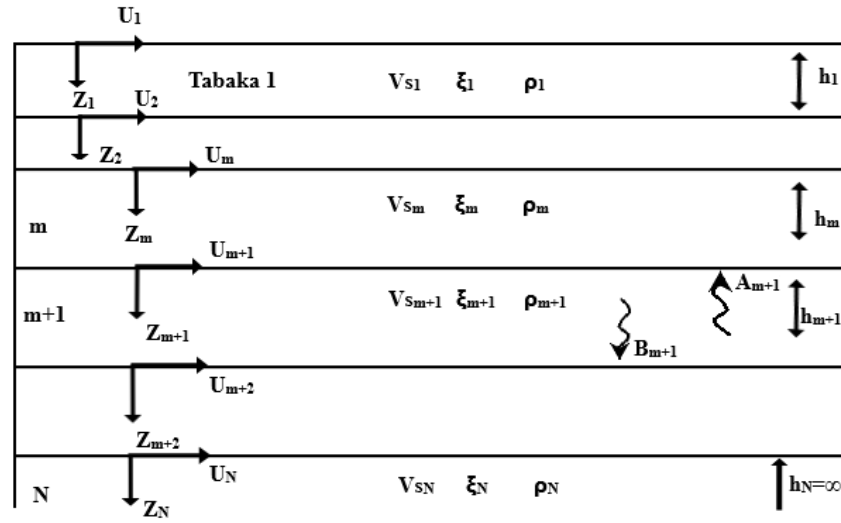
$$H(\omega_n) = \frac{1}{-m\omega_n^2 + ic\omega_n + k} = \frac{1}{k(-\beta_n^2 + 2i\beta_n\xi + 1)} \quad (2.11)$$

Burada  $\beta$  sistemin doğal salınım periyoduna göre frekans ayarlamasını ( $T_0/\omega_0$ ) ederken  $\xi$  de sönüm katsayısının kritik sönüm katsayısına oranı olan sönüm oranını ifade etmektedir.

şimdi ana kaya üzerinde N adet yatay homojen yarı sonsuz izotropik tabakalardan oluşan durum için (şekil 2.5) transfer fonksiyonu hesabını irdeleyelim. Yukardaki çıkarımların ardından dalga denkleminin çözümün karmaşık notasyona bağlı üstel biçimde Eşitlik (2.12)'deki gibi ifade edilebilir:

$$u(z,t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)} \quad (2.12)$$

A ve B sırasıyla  $-z$  (aşağı) ve  $+z$  (yukarı) yönlerinde hareket eden dalga genliklerini ifade etmektedir.  $t$ : zamanı,  $\omega$ : açısal frekansı ve  $k^*$  da karmaşık dalga sayısını ( $w/Vs^*$ ) ifade etmektedir. Karmaşık kesme dalga hızını ifade eden  $Vs^* = Vs(1+i^*\xi)$ 'dir. Toplam yer değiştirme ( $U_{m,w}$ ) aşağı ve yukarı yönlü dalga genliklerinin toplamına eşittir. Burada  $h_m$  zemin tabakalarına ait kalınlıları ve  $\alpha_m^*$  de m.tabakaya ait karmaşık empedans oranını belirtmektedir (Eşitlik 2.1).



Şekil 2.5. Elastik ana kaya üzerindeki zemin tabakaları ve hesaplamada kullanılan terimlerin gösterimi. Çizim temsili ve ölçeksiz olup tabakalar yatay yönde de sonsuz uzanmaktadır.

Yukarı ve aşağı dalga hareketine ait genlikler Eşitlik (2.13a ve b) gibi ifade edilebilir (Tsai, 1970).

$$A_{m+1} = \frac{1}{2}A_m(1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^*h_m} + \frac{1}{2}B_m(1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^*h_m} \quad (2.13a)$$

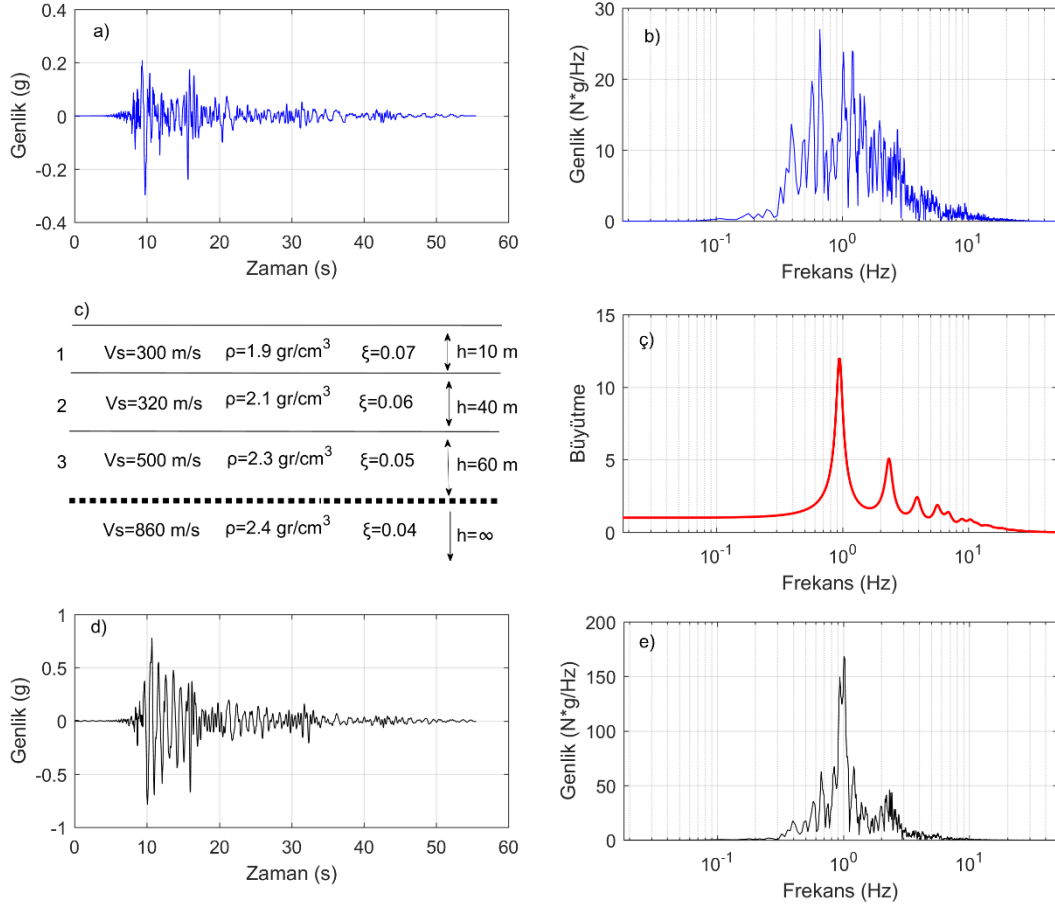
$$B_{m+1} = \frac{1}{2}A_m(1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^*h_m} + \frac{1}{2}B_m(1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^*h_m} \quad (2.13b)$$

Bu sayede yüzey tabakada oluşan frekansa bağlı büyütme (transfer fonksiyonu), yüzeyde hesaplanan yer değiştirmelerin ( $U_1$ ) ana kayadaki hesaplanan yer değiştirmelere ( $U_N$ ) oranı olarak ifade edilebilir (Eşitlik 2.14).

$$F(\omega) = \frac{U_1}{U_N} \quad (2.14)$$

Bu alt bölümde doğrusal yaklaşıma ait çözümler sonrası, elastik ana kaya üzerinde  $N$  adet yatay tabakalı zemin çökellerinin büyütmeleri (transfer fonksiyonları) temsili bir zemin profili için örnek bir girdi yer ivme kaydı ile ilgilenilen noktanın en büyük yer ivmesi hesaplanacaktır.

24.01.2020, 20.55'de Elazığ-Sivrice (Türkiye) merkez üssü olan 6,8 moment magnitudlü (Mw) depremin ivme kaydı çok tabakalı doğrusal yaklaşım için girdi olarak alınmıştır (Şekil 2.6a).



Şekil 2.6. Doğrusal yaklaşım ile transfer fonksiyonu ve yüzey çıktı hareketi hesabı. a) Sivrice Depremi yatay ivme kaydı (girdi hareketi). b) Kaydın Fourier Genlik Spektrumu. c) Üç tabakalı model zemin profili. ç) SH transfer fonksiyonu. d) Yüzey çıktı hareketi. e) Yüzey çıktı hareketinin Fourier genlik spektrumu. Fourier genlik birimindeki N, ilgilenilen frekans için zaman serisi verisinin örnekleme noktası sayısını belirtmektedir.

Teoride girdi hareketi ana kaya kaydıdır. Çünkü zemin tabakaları ana kaya kaydını transfer ederek yüzey çıktı hareketini oluşturur. Depreme 24 km uzaklıkta Sivrice istasyonu (2308 kodlu) jeolojik olarak mezozoik yaşlı gabro birimleri üzerinde kuruldu. Dolayısıyla, bu istasyon kaydı ana kaya girdi hareketi olarak değerlendirilebilir. İstasyonda en büyük yer ivmesi (EBYİ) Doğu-Batı bileşeninde 0.303 g olarak kaydedilmiştir. Temsili olarak oluşturulan üç tabakalı zemin modeline

(Şekil 2.6c) ait büyütme (transfer fonksiyonu) hesaplanmıştır (Şekil 2.6ç). Transfer fonksiyonunu hesaplamada çok tabakalı sisteme bağlı yansımalar tek tabaka transfer fonksiyonu hesabına göre daha karmaşıktır. Bu sebeple hesaplama Matlab’de yazılan bir fonksiyon ile yapılmıştır. Şekil 2.6b’de kaydın genlik spektrumu hızlı Fourier dönüşümü ile hesaplanmıştır. Frekans ortamında genlik spektrumu ve transfer fonksiyonun birebir çarpımı yüzey çıktı hareketinin genlik spektrumunu (Şekil 2.6e) açığa çıkarmamızı sağlayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken husus sismometrenin örnekleme frekansı ve kayıt uzunluğu ile hesaplanan büyütme fonksiyonuna ait frekansların eşdeğer olmasıdır. Elde edilen yüzey çıktı hareketine ait genlik spektrumunun ters hızlı Fourier dönüşümü ile de yüzey çıktı hareketi elde edilir (Şekil 2.6d). Kaydın doğal olarak dalga biçiminin değiştiği ve en yüksek yer ivmesinin 0,75 g olarak arttığı gözden kaçmamalıdır. Bu örnekte, depremin baskın frekanslarının ve yüksek büyütme görüldüğü frekansların örtüşmesi yüzeyde yüksek EBYİ’nin kestirilmesine neden olmuştur. Özellikle 0,93 Hz’deki 11 faktör büyütme, çıktı hareketine ait spektrumu biçimlendirmiştir. Bilhassa ilk tabakanın sığ ve kesme dalga hızının nispeten az olması büyütme artıran faktörlerden biridir.

Doğrusal ve eşdeğer-doğrusal çözümler yüksek büyütme ve yapay rezonans frekanslar oluşturmaya yol açabilmektedir. Bu tip sorunların üstesinden gelmek için transfer fonksiyonu hesabında dalga denkleminin sonlu farklar yöntemi ile doğrusal olmayan çözümleri geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında doğrusal olmayan zemin davranışlarından kaçınıldığı ve aletsel veri tabanlı çözümler gerçekleştirildiği için bu yaklaşımlar irdelenmeyecektir.

### **2.2.2. Teorik Yatay/Düşey (H/V) Spektral Oran Yaklaşımları**

Bu konuda temel iki yaklaşım vardır. Biri; P ve Sv (düşey yönde polarize olan kesme dalgaları) tarafından temsil edilen Rayleigh dalgalarının eliptik eğrisel davranış sergileyen özellikleri kullanılarak hesaplanan transfer fonksiyonu (Ende 2000; Fah ve diğ., 2001; Wathélet M., 2008); Hobiger, M., ve diğ.,2009) diğeri de zemin tabakalarında yayılan SH (yatay yöne polarize olan kesme dalgası) ve P dalgaları özelliklerine dayanan hesaplamadır. İkisi de hareket denkleminin üstel Euler eşitliğinin sınırlarda gerilme ve yamulmaları tanımlayan Hook yasasına dayanır. Ayırt



edici olarak, ilk yaklaşımda özetle Rayleigh dalgasının dispersiyon fonksiyonu kullanılarak teorik H/V'ler hesaplanırken ikinci yaklaşımda özetle SH'ların tabakaların empedans özelliklerine göre transfer fonksiyonları hesaplanarak H/V'ler elde edilmektedir. Ayrıca son zamanlarda saçılmış alanlar yaklaşımının akustik dalga denkleminin çözümüne uyarlanması ve Green fonksiyonlarının hesaplanması sonucu teorik H/V'ler de hesaplanabilmektedir (Piña-Flores, ve diğ. 2016; García-Jerez ve diğ. 2016). Bu bölümde ikinci yaklaşım incelenecek ve örnek bir uygulama verilecektir.

P ve S dalgalarının transfer fonksiyonlarının rekürsif (yinelemeli) bir algoritmaya dayalı hesaplanması Tsai (1969, 1970) tarafından önerilmiştir. Teorik hesaplama Bölüm 2.2.1'de anlatılan lineer elastik tabakalar içinde düşey yönde yayılıp yatay yönde polarize olan (SH) düzlem dalgaların hareket denkleminin sinüzoidal kararlı-durum tabanlı çözümüne dayanmaktadır. Çözüm, elastik ve viskoz sabitler değiştirilerek P dalgası için de uyarlanabilir. Bu bağlamda, kısa süreli periyodik olmayan dalga sinyalleri ve mikrotremorler üzerine çalışmalar yapılmıştır (Tsai ve Housner, 1970). Ardından Herak (1985 ve 2008) çalışmalarıyla elastik olmayan özellikleri kontrol eden frekans bağımlı kalite faktörünü (Q, Eşitlik 2.15) de hesaba katarak geliştirmiştir.

$$Q(f) = Q_0 f^k \quad (2.15)$$

Burada  $Q_0=Q(1 \text{ Hz})$ ,  $f$ , frekans ve  $k$  tüm tabakalar için eşit kabul edilen bir katsayıdır. Cisim dalga dispersiyonları sabit Q modelleri ( $k=0$ ) için Aki ve Richards (2002)'nin önerdiği logaritmik yasayı dikkate alır (Eşitlik 2.16).

$$v(f) = v(f_{ref}) * (1 + (\pi Q_0)^{-1} * \ln\left(\frac{f}{f_{ref}}\right)) \quad (2.16)$$

$v(f)$ , P veya S dalgalarına ait  $f$  frekanslarındaki hızları,  $f_{ref}$ , ölçülen bir hıza ait referans frekansı belirtmektedir.

Düşey yönde yayılan  $AMP_s$  (S dalgası büyütmesi) ve  $AMP_p$  (P dalgası büyütmesi) sırasıyla yatay ve düşey bileşenleri temsil etmektedir. Böylece yüzeydeki yatay ve

düşey spektrum oranları frekansların bir fonksiyonu olarak Eşitlik 2.17'deki gibi ifade edilebilir.

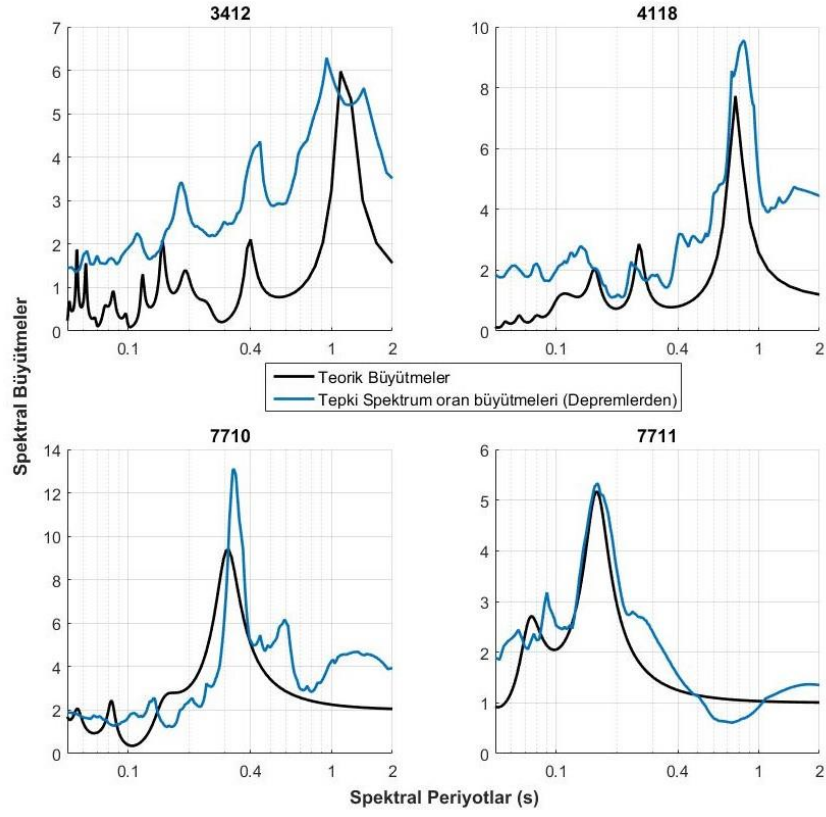
$$HVSR(f) = \frac{AMP_s(f)}{AMP_p(f)} \quad (2.17)$$

Bu kapsamda büyütmeler bu yaklaşımda, sismik empedanslar, zemin tabakaları içinde kalınlık ve hızlara bağlı seyahat zamanları ve 1 Hz'deki kalite faktörleri ile kontrol edilmektedir. Model zemin profili her bir tabaka için dört ölçüt ( $h, v, \rho, Q_0$ ) tarafından tanımlanır. Burada yalnız  $Q_0$  diğer parametrelerden bağımsızdır. Bu da, eğer deneysel (aletsel) HVSR eğrilerinin ters çözümüyle parametrelerin kestirimi en az bağımsız bir ölçüt olmadığı durumda özgün sonuçlar üretmeyeceği sorunsalı doğurur.

Sismik tehlike ve mikro bölgeleme çalışmalarında HVSR(f), kesme dalgalarının oluşturduğu kuvvetli sarsıntıların büyüklük kestirimleri için kullanılır ve bu yüzden zemindeki sismik kuvveti tanımlar. Bu bölümde sayısal uygulama olarak sunulacak dört istasyona ait sonuçlar ve zemin modelleri verilecektir. Burada karşılaştırma için deneysel spektral oranlar (Bölüm 2.2.3) 26 Eylül 2019'da Marmara Denizinde meydana gelen 5,8 Mw büyüklüğündeki İstanbul depremi için hesaplanmıştır.

Güvenilir geoteknik bilgiye sahip istasyonlarda teorik spektral oranlar hesaplanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.7). Zemin modelleri AFAD istasyon raporlarına dayanarak 3412, 4118, 7710 ve 7711 istasyonları için hazırlanmıştır (Tablo 2.2). Bir boyutlu teorik transfer fonksiyonları Şekil 5'de görüleceği üzere bir boyutlu model kısıtlamaları nedeni ile farklılık gösterse de baskın periyotlar deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.

Deprem örneğinin ardından bir de mikrotremor kaynaklı bir karşılaştırma da Şekil 2.8'de görülmektedir. AFAD 3112 istasyon kodlu noktada alınan bir saatlik bir mikrotremor ölçüsü değerlendirilerek Fourier analizi tabanlı HVSR'leri elde edilmiştir.

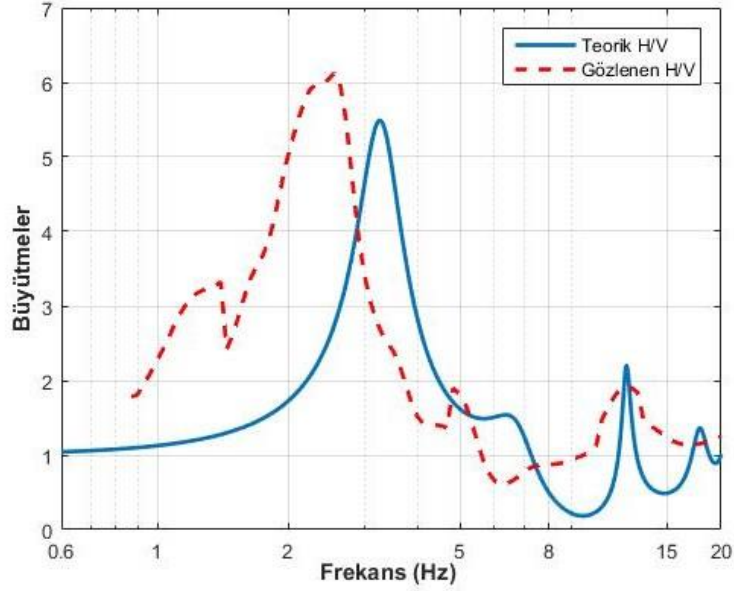


Şekil 2.7. Teorik büyütmeler ve tepki spektrum oranlarının karşılaştırılması

Tablo 2.2 Teorik H/V hesaplamaları için istasyonlara ait zemin modelleri.  $V_p$ : P-dalgası hızı,  $V_s$ : Kesme dalgası hızı,  $Q_p$ : Kalite Faktörleri,  $q$ =Yoğunluk,  $H$ : Tabaka Kalınlıkları

İstasyon	Tabaka no	$V_p$ (m/sn)	$V_s$ (m/sn)	$Q_p$	$Q_s$	$q$ (g/cm <sup>3</sup> )	H (m)
4118	1	504	170	10	5	1.4	10
	2	1150	200	30	10	1.9	50
	$\infty$	2200	864	150	70	2.6	--
3412	1	560	187	10	5	1.4	7
	2	1100	190	30	10	1.9	13
	3	2115	220	50	35	2.3	45
	$\infty$	3250	960	150	75	2.6	--
7710	1	621	200	15	10	1.6	10
	2	1350	350	35	15	2.1	30
	$\infty$	2250	986	160	90	2.6	--
7711	1	600	220	15	10	1.6	5
	2	1310	280	40	15	2.1	15
	$\infty$	2120	986	160	90	2.6	--

Teorik hesaplanan büyütme gözlemsel veriden elde edilenden daha düşük çıkarken baskın frekansların yakın fakat gözlemselde daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8. Teorik büyütme oranları ve Fourier spektrum oranlarının karşılaştırılması

Hesaplamadan ve karşılaştırmamalardan görülmektedir ki; deprem veya sismik gürültü kaynaklı çözümlerde önemli olan geoteknik zemin bilgisinin güvenilir olması doğru sonuçlar üretmede ana esaslardandır. Geoteknik bilgiye ulaşma her zaman mümkün olmaması ve maliyetli olması nedeniyle deneysel (aletsel) verilerin (deprem, yapay sismik kaynaklı sinyaller) iyi toplanması ve işlenmesi ehemmiyetli sonuçlar üretmede hayati önem arz etmektedir.

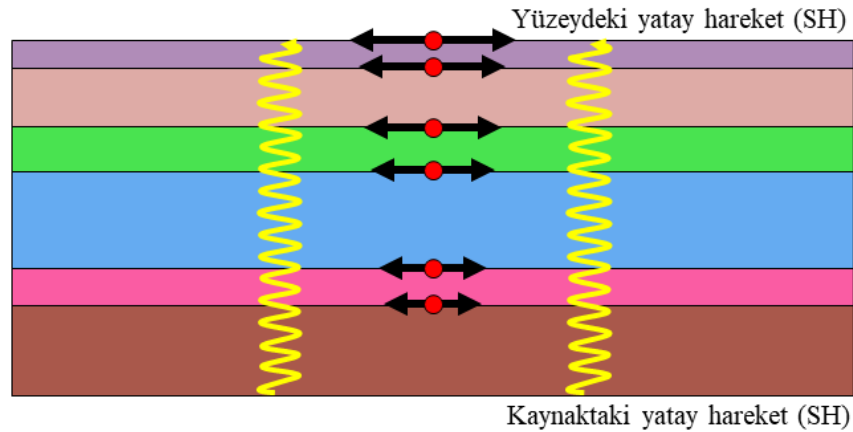
### 2.3. Zemin Transfer Fonksiyonlarını (Büyütmeler) Ve Baskın Periyotlarını Elde Etmede Deneysel (Aletsel) Yaklaşımlar

Tüm aletsel ve teorik çalışmalar zemin büyütme transfer fonksiyonunun en niceleyici ve güvenilir göstergesi olarak standart spektral oranlar yöntemi (SRSR) olduğuna kanaat getirmektedir. Deprem ve/veya mikrotremorlere (titreşimcik) ait sinyal/gürültü oranı yüksek, jeolojik formasyonun, topoğrafyanın ve özellikle uzaklığın kayda değer değişim göstermediği noktalarda sedimanter zemin kayıtlarının ana kaya kaydına spektral oranını ifade esen SRSR yöntemi her zaman bu şartları sağlayamaması

sismologları ve deprem mühendislerini başka yöntemler keşfetmeye sürüklemiştir. Literatürde deprem kayıtlarına uygulanan bileşenlerin spektral oranına HVSR, sismik gürültü kayıtlarına uygulanana ise HVNR olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemlerden son yıllarda en sık başvurulana olan aynı noktadaki üç bileşen kayıtlar kullanılarak yatay spektrumların düşey spektrumlara oranları, yüzlerce çalışma ile başarısını ortaya koymayı sürdürmektedir.

Nakamura 1989'da, mikrotremorler üzerinde HVNR tekniğini tanıtmadan önce, Langston (1979) zayıf ve kuvvetli yer hareketlerinin HVSR oranlarını hesaplamıştır. Kabuk ve üst mantonun hız yapısını belirlemek için, yer hareketinin düşey bileşeninin yerel yapıdan etkilenmediği, yatay bileşenlerin ise zemin altı süreksizliklerden dolayı P-S dalga dönüşümüne sahip olduğunu keşfetmiştir. Bu yüzden, zemine ait düşey bileşeni yatay bileşenden dekonvole ederek impuls tepki spektrumu veya alıcı fonksiyonlarının kestirilebileceği öne sürülmüştür (Field ve Klaus, 1995). Eşitlik 2.18 ve Şekil 2.9'da bu etki özetlenerek resmedilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın bu kısmında, deprem kayıtlarının tepki (RHV) ve Fourier spektrum (FHV) oranları anlatılarak son depremlerden örnek çalışmalar sunulacaktır.

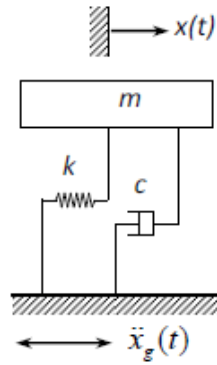
$$\frac{H}{V} = \frac{\text{kaynak etkisi} \cdot \text{yol etkisi} \cdot \text{zemin etkisi}}{\text{kaynak etkisi} \cdot \text{yol etkisi}} \quad (2.18)$$



Şekil 2.9. Kaynaktan zemine SH dalga hareketi ve Eşitlik 2.18'e bağlı zemin etkisinin belirlenmesi

### 2.3.1. Deprem Tepki Spektrum Oranları (RHV)

Tepki spektrumları, bir depreme maruz kalan tek serbestlik dereceli sistemlerin (TSD) maksimum tepkisini spektral periyotların fonksiyonu olarak gösteren eğrilerdir. Tepki spektrum eğrisi tek serbestlik dereceli bir sistemin verilen bir sönüm oranı için en yüksek konumu olarak yorumlanır. Bu da depreme bağlı olarak yapıda gelişen yatay kuvvetleri elde etmede kullanılır.  $\ddot{x}_g(t)$  yer ivmesine sahip bir harekete maruz kalan bir TSD sistemin hareket denklemi Eşitlik 2.19 ve Şekil 2.10'daki gibidir;



Şekil 2.10. TSD Sönümlü sistemin yer hareketi etkisinde yer değiştirmesi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \ddot{x}(t) + 2\varphi\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (2.19)$$

Burada,  $m$  kütle,  $c$  kritik sönümü,  $k$  sertliği,  $\varphi$ , sönüm oranını,  $\omega_0$  sistemin temel açılmalık frekansını temsil etmektedir. Bu ikinci dereceden lineer adi diferansiyel denklemi Duhamel integralinin sıfır başlangıç koşulları için çözülebilir (Eşitlik 2.20) (Agrawal ve Shrikhande, 2006).

$$x(t) = -\int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \frac{e^{-\varphi\omega_0(t-\tau)}}{\omega_d} \sin\omega_d(-\tau) d\tau \quad (2.20)$$

Tez çalışmasında, tüm yakın alan deprem verilerinin tepki spektrum hesaplamaları Matlab programı aracı ile Wang L.J (1996) 'nın kodu düzenlenerek spektral çözüme dayalı yaklaşım ile elde edilmiştir. TSD sistem için hesaplanan elastik tepki spektrumları örnekleme aralığına bağlı her bir spektral periyod için çözülmüştür.

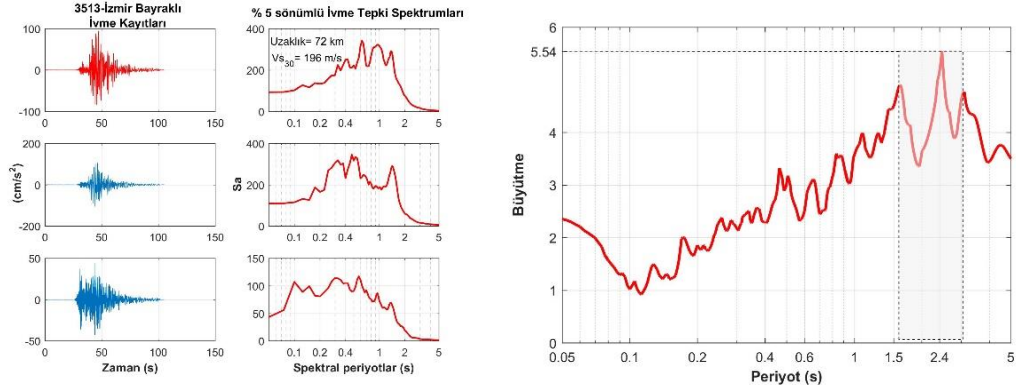
Lineer diferansiyel hareket denkleminin çözümü kare matrisler üzerinde uygulanan matris üstel çözüm yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Sıfır başlangıç koşulları ile açılmal frekanslar ve katılık vektörlerinden oluşan matrisin üstel çözümü ve birim matrise oranı hareket denkleminde yerine konularak yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Sonrasında mutlak ve sözde (pseudo) ivmeler hesaplanarak ivme tepki spektrumları elde edilmiştir. Bu sürecin daha kolay anlaşılabilmesi için programlama dili ile ifade edelim;

Hareket denklemini (Eşitlik 2.19) şu şekilde yazalım;

$$y''(t) + 2\xi\omega y'(t) + \omega^2 y(t) = -f(t);$$

Başlangıç koşulları  $y(0)=0$  ve  $y'(0)=0$  olsun. Burada  $f(t)$  deprem ivme kaydı,  $t$  spektral periyotlar,  $\xi$  kritik sönüm faktörü,  $dt$  de saniye cinsinden örnekleme aralığı olsun. Açılmal frekansı  $\omega=2\pi/t$  ile belirtip, kritik sönüm ve sertliği  $C=2\xi\omega$  ve  $K=\omega^2$  olarak ifade edelim. Başlangıç için;  $y(:,1) = [0;0]$  diyelim. Hareket denkleminin matris formu  $A = [0 \ 1; -K \ -C]$  şeklinde gösterelim.  $A$ 'nın üstel matris çözümüne  $Ae$  diyelim. Her bir örnekleme aralığı için çözülen  $Ae$ 'nin birim matris ile başlangıç koşulları çarpılarak  $A$  matrisine bölümünü oluşturan  $AeB$  çıktı matrisini elde edelim. Böylece deprem girdi hareketine göre çıktı yer değiştirmeleri ve hızları elde edebiliriz:  $y(:,t) = Ae*y(:,t-1) + AeB*f(t+1)$ . Burada  $t$ 'nin uzunluğuna bağlı  $[2*t]$  boyutlu bir matris ortaya çıkacaktır.  $y(1,:)$  yer değiştirmeleri  $y(2,:)$  de hızları ifade edecektir. Yanal direnç kuvvetine  $f_{vm} = \omega^2*y(1,:)$  dersek mutlak ivmeler  $-C*y(2,:)*f_{vm}$  sözde (pseudo) ivmeler de maksimum yer değiştirmelerin  $\omega^2$  ile çarpımı olarak hesaplanacaktır.

Tüm işlemler her bir bileşen için gerçekleştirilip ayrı ayrı  $EK-C$ 'de programlanıp oluşturulan fonksiyon ile hesaplanmıştır. Örnek olarak 30.10.2020'de İzmir Seferihisar açıklarında Sisam adası Kuzeyinde meydana gelen 7 Mw büyüklüğündeki depremin İzmir Bayraklı kaydı üzerinde Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Yatay bileşenlerin karekök ortalaması alınıp yatay bileşen %5 sönümlü ( $\xi=0.05$  veya  $\phi=0.05$ ) tepki spektrumu hesaplanarak düşey tepki spektrumuna bölünmüş ve zemin baskın periyoduna karşılık gelen spektral büyütme elde edilmiştir. Bu hesaplamada tüm dalga formu yani tüm fazlar kullanılmıştır.

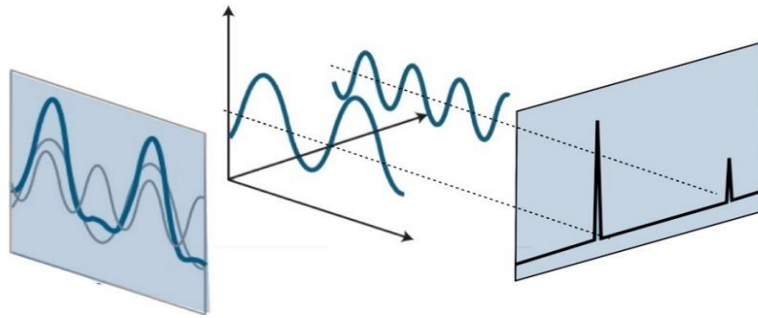


Şekil 2.11. 2020 İzmir depreminin AFAD 3513 kodlu istasyonun kaydedilen dalga formları ve tepki spektrum ve oranları (kayıtlar yukarıdan aşağıya E (Doğu-Batı), N (Kuzey-Güney) ve düşey bileşenlerdir).

### 2.3.2. Deprem Fourier Spektrum Oranları (FHV)

Fourier serileri, periyodik olmayan deprem dalgalarının sinüs ve kosinüslerine ayrıştırılıp toplanarak modellenmesine dayanır (Şekil 2.12). Burada da deprem kayıtları ile ayırık Fourier dönüşümü temelli hızlı Fourier dönüşüm algoritması (Good, 1958; Cooley ve Tukey, 1972; Frigo ve Johnson, 1998) kullanılarak tüm bileşenlere ait spektrumlar ve oranları elde edilmiştir. N uzunluklu deprem girdi hareketinin ayırık Fourier dönüşümü Eşitlik 2.21’de verilmiştir.

$$x(f) = \sum_{t=1}^N x(t)e^{i2\pi(f-1)(t-1)/N} \quad (2.21)$$

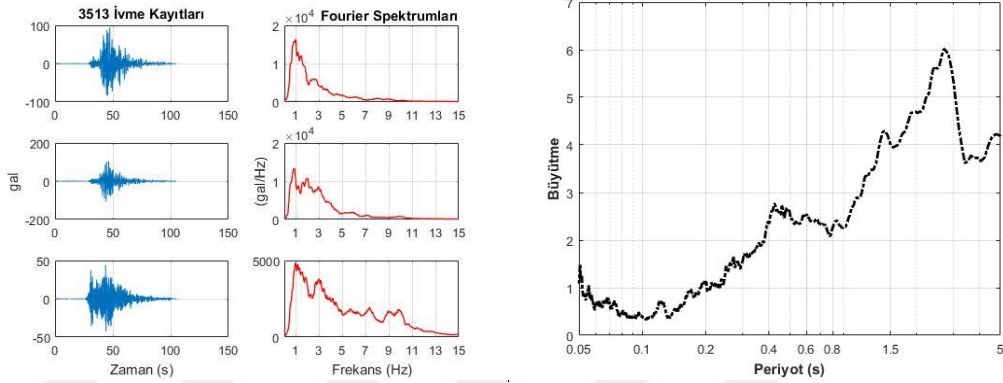


Şekil 2.12. Fourier dönüşümünün grafiksel temsili gösterimi

Örnek bir çözüm olarak tepki spektrum oranları hesaplamasında olduğu gibi aynı deprem kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.13’de Fourier hesaplamaları Konno-Ohmachi (Konno ve Ohmachi, 1998; Livaoglu ve Şentürk,



2018) ve kayan ortalama fonksiyonları ile spektral ortamda yumuşatılırken tepki spektrum analizlerinde %5 kritik sönüm spektrumun yumuşamasına neden olmaktadır. Fourier ve tepki spektrum oranlarının karşılaştırılması Bölüm 5.1’de detaylı olarak irdelenecektir.



Şekil 2.13. 2020 İzmir depreminin AFAD 3513 kodlu istasyonun kaydedilen dalga formları ve Fourier spektrum ve oranları (kayıtlar yukarıdan aşağıya E (Doğu-Batı), N (Kuzey-Güney) ve düşey bileşenlerdir).

Deprem verilerine dayalı spektral oranlarla gerçekleştirilen zemin tepki analizi hakkında yapılan bazı çalışmaların derlemesi ve karşılaştırılan yöntemlerle uyumu Tablo 2.3’de özetlenmiştir. Zemin tepki analizlerinin özellikle deneysel (aletsel) tabanlı veri setine dayanan çözümlerinde seneler geçtikçe toplanan veri sayısı (deprem, mobil ölçümler) ve kalitesinin artması araştırmacıları yeni bulgular ortaya koymaya teşvik etmiştir.

Edwards ve diğ., (2013)’ de düşük sismisiteli bölgelerde (İsveç vb.) önerdiği ampirik büyütme yaklaşımında tek istasyon gürültü ölçümleri analizine (HVNR,HVSR) dayanan genliklerin zemin hareketini büyütmeyi yansıtamayacağını vurgulamıştır. Rong ve diğ., (2016) çalışmasında doğrusal olmayan davranışlar üreten büyük deprem kayıtlarına (M>6) ait spektral oranların (HVSR) bir boyutlu eşdeğer doğrusal çözüm (ELFT) ve standart spektral oranlar (SRSR) ile iyi uyum gösterdiği ve kullanılabilirliğini öne sürmüştür.

Tablo 2.3. Deprem verilerine uygulanan spektral oranların (HVSR), sismik gürültü oranları (HVNR) ve standart spektral oranlara (SRSR) göre uyum kalitesini gösteren bazı çalışmalar (T<sub>0</sub>: Baskın periyotlar, A<sub>0</sub>: Baskın Genlikler, ELTF: Eşdeğer doğrusal zemin tepkisi çözümü)

Yazar, Kaynak	Veri tipi	Sonuçların Kalitesi <sup>1)</sup>	Sonuçların yöntemlerle uyumu <sup>1)</sup>			
			HVNR		SRSR/ELTF	
			T <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	T <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>
Chávez-García ve Cuenca, 1998	İvme, hız	●	●	●	●	●
Lachet ve diğ., 1994	İvme	○	-	-	-	-
Özel ve diğ., 2002	İvme, hız	●	-	-	●	●
Raptakıs ve diğ., 1998	İvme	●	-	-	○	●
Satoh ve diğ., 2001b	Hız	●	●	●	○	●
Taber, 2000	Hız	○	○	●	●	○
Theodulidis ve Bard, 1995	İvme	○	-	-	○	●
Tsuboi ve diğ., 2001	İvme	○	-	-	-	-
Zaslavsky ve Shapira, 1998	Hız	●	●	●	-	-
Zaslavsky ve diğ., 1998	Hız	●	●	●	○	●
Edwards B., ve diğ., 2013	Hız	●	●	○	●	○
Rong ve diğ., 2016	İvme	●	●	○	●	●

<sup>1)</sup> ● yüksek/iyi ○ makul/orta ○ düşük/az

#### 2.4.Farklı zemin tepki analiz kestirimlerinin değerlendirilmesi

Bu bölüm kapsamında anlatılan analitik (teorik) yaklaşımlar detaylı geoteknik bilgiye dayalı iken aletsel (deneysel) yöntemler esas olarak yüzeyde istasyonlarca kaydedilen deprem yer hareketi sinyallerinin işlenmesine odaklıydı. Ekonomik açıdan bakıldığında, aletsel yöntemlerin ortaya çıkardığı sonuçlar ile teorik tabanlı yaklaşımların sonuçları iktisadi gereksinimlerin çıktısı olarak ortak hedefte dengede tutulabilir. Şöyle ki; hedeflenen kentsel dönüşüm gibi büyük projeler ile deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde her ikisi birden yürütülebilecek iken, daha düşük sismik aktivite gösteren bölgelerde özellikle jeolojik-jeoteknik raporlamalarda deneysel harcamaları düşürmek adına yalnız deneysel yöntemlere başvurulabilir.

Yöntemlerin mühendislik amaçlı hizmetlere ne tür katkılar yapacağı somut olarak belirtilmelidir. Buradaki somut durum, deprem kayıtlarının analizi, kaynağa ait transfer fonksiyonunun hesap edilip zemin özelliklerinin belirlenmesidir. Dolayısıyla

daha güvenilir sonuçlar üretmek adına kullanılan aletsel (deneysel) ve teorik yaklaşımların özetle çıktısı şu parametrelerdir;

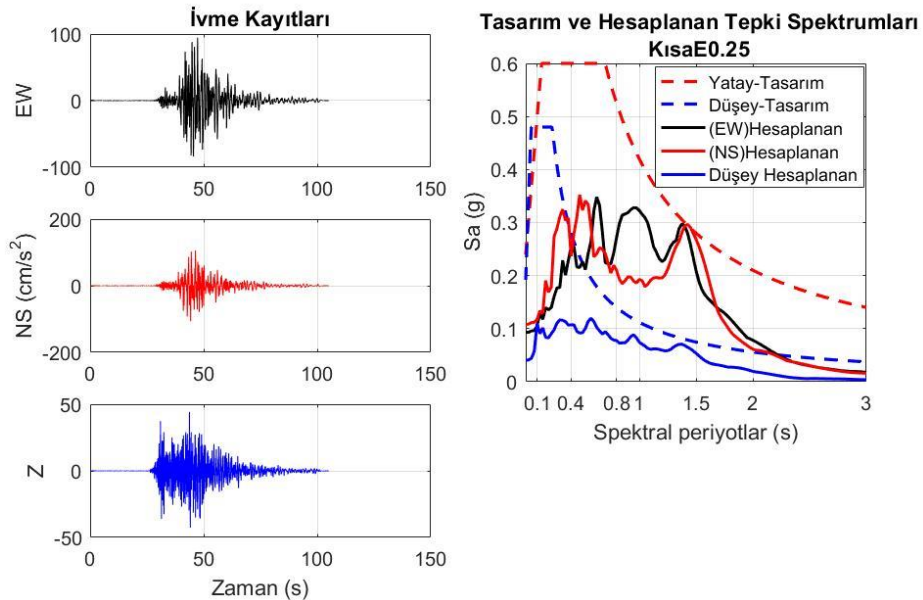
-zemin baskın periyod aralıkları,

-zemin büyütme düzeyi,

-yerel zemin koşullarının transfer fonksiyonu,

-depreme karşı zemin tepkisi.

Özellikle aletsel yöntemlerin bir diğer önemli çıktısı da, mühendislik yapılarının inşasında kullanılan yönetmeliklerde belirlenen tasarım spektrumlarının spektral şekillerine olan katkısıdır. Elastik tasarım ivme spektrumlarında esas alınan parametrelerden zemin sınıfının belirlenmesine yönelik bu çalışmada da irdelenen baskın periyotlar ve spektral şekillerin beraber çalıştırılarak daha güvenilir ve doğru sonuçlar üretmesi beklenen deprem hasarlarının azaltılmasında büyük rol oynayacağı şüphesizdir. Bu kapsamda İzmir, Seferihisar açıklarında 30 Ekim 2020’de meydana gelen 6.9 Mw büyüklüğündeki yıkıcı depremin en çok hasar verdiği Bayraklı ilçesinde elde edilen kaydın analizi Şekil 2.14’ gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Depremin 3513 kodlu istasyon kaydına ait tepki ve tasarım spektrumlarının karşılaştırılması.

Beklenen en büyük yer ivmesi 0.6g, ZE zemin sınıfı ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyine göre hesaplanan (Livaoğlu H., 2020) yatay ve düşey tasarım spektrumları sırası ile kırmızı ve mavi kesikli eğriler ile gösterilmektedir. Burada ZE yerel zemin sınıfının hakikaten doğurmuş olduğu geniş periyotlardaki spektral büyütme tasarım spektrumlarını aşmasa da zorlayarak depremin tanımlanmasını güçleştirmektedir. Dolayısıyla, ilerleyen bölümlerde de üzerinde durulacak olan yerel zemin sınıflarının belirlenmesinde aletsel (deneysel) yaklaşımların ürettiği sonuçlar irdelenip sonuçlandırılacaktır.



### **3. ALETSEL (DENEYSEL) TABANLI SİSMİK ZEMİN SINIFLAMA**

Mühendislik amaçları doğrultusunda zeminlerin sınıflandırılması deprem yönetmeliklerince tüm dünyada 1950'lerden bu yana geliştirilerek yapılmaktadır. İlk önceleri jeolojik ve mekanik zaviyelerden gerçekleştirilen zemin analizlerine bağlı tayinler daha sonraları teknolojik imkânların artmasıyla deprem yönetmeliklerinde etkin bir rol üstlenmeye başlamıştır. Teorik çözümlerden değişik açıdan özellikle jeofizik disiplinindeki aletsel imkânlardaki yenilikler ve gelişmeler mühendislik sismolojisi çalışmalarında deprem mühendislerine yeni ufuklar ve sismologlarla yeni ortak çalışma alanları açmıştır.

Bu bölümde sismik zemin sınıflamalarına ait geniş bir literatür çalışması irdelenmiş ve detaylı bir şekilde derlenmiştir. Deprem istasyonlarının yanısıra sahaya özel çalışmalarda ve depreme dayanıklı bina tasarımının temelini oluşturan zemin sınıflama kriterleri geniş ölçekte araştırılmıştır. Bu araştırma tez çalışmasında hangi problemlerin üstüne gidileceği noktasında yol gösterici olmuştur. Alt başlıklarda zemin sınıflamasının amacı, mevcut şemalar ve zemin sınıflama yöntemine dair öneriler sunulacaktır.

#### **3.1. Zemin sınıflamasının amacı**

Seçilen bir zeminde güvenilir sismik tasarım yüklerini belirlemek için, zeminin büyütme potansiyelinin tanımlanması gerekir. Sismik zemin büyütmesi, sismik hareketliliğin seviyesinden çok yerel zemin koşullarına bağlıdır. Bu yüzden zemin koşullarının güvenilir bir sınıflaması temin edilmelidir.

Çeşitli sınıflama şemaları genellikle farklı uluslararası deprem yönetmeliklerinde belirtilmiştir. Çoğu sınıflama, zemin yoğunluğunun 30 metrelik üst profil kesitlerine ait Jeoteknik ve dinamik özellikleri bilinen tabakalar temel alınarak oluşturulmuştur. Uygulamada, zemin gruplarının genel tanımı, litolojik olarak kaya, sıkı sedimanlar ve yumuşak zeminler olarak ifade edilir. Her bir zemin sınıfı için farklı biçimli elastik

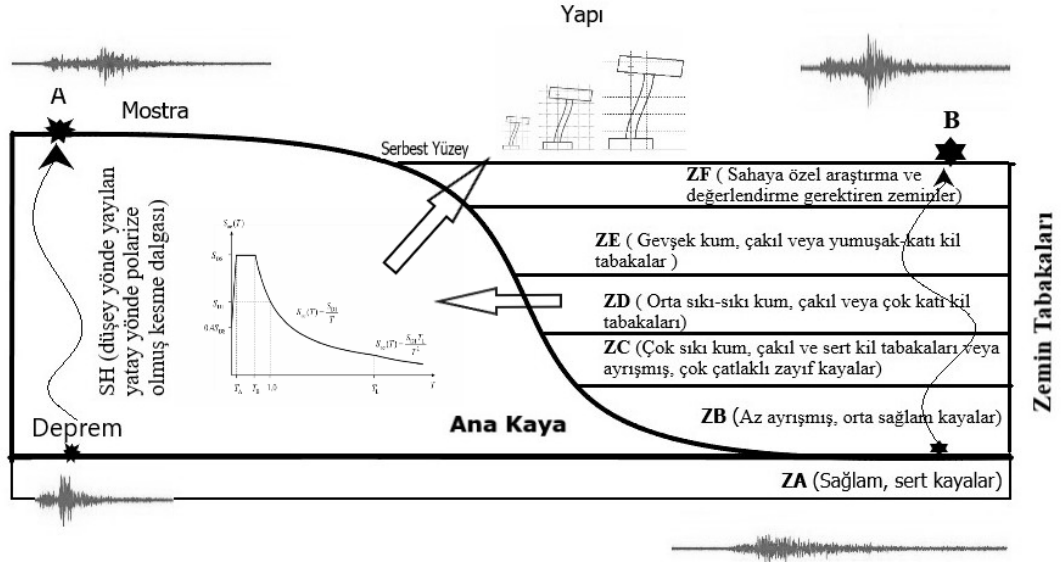
tasarım spektrumları tanımlanarak, büyütme ve frekans içeriği üzerindeki etkileri nitelendirilebilir. Depreme dayanaklı tasarım yönetmeliklerinde yerel zemin koşulları genellikle en yüksek genliğe karşılık gelen köşe frekansları ve anakayaya göre olan büyütme hesapları katılarak değerlendirilir.

Yüze yakın zemin tabakalarının yoğunluğu sismik dalgaların transfer ve büyütme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha basit ifade etmek için, zemin koşullarının ve dağılımlarının genelleştirilerek daha az veya çok detaylı birçok sınıfa ayrılması gerekmektedir. Bu yüzden, çoğu güncel yönetmeliğin zemin sınıf şemalarının zemin büyütme açısından yeterli olup olmadığı dikkate alınmalıdır. Zemin yoğunluğu ve sediman tabakaların toplam kalınlıklarına ek olarak zemin büyütme özellikleri, yüzey tabakaları veya doğrusal olmayan zemin özelliklerinin etkisi altında olabilir.

Sismik zemin değerlendirmelerinin önemi sismik yükleri belirleyerek yapısal hasarı kestirmek veya yorumlamanın yanısıra, aynı zamanda mühendislik sismolojisinin ve deprem mühendisliğinin ortak paydalar etrafında müşterek çalışarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretmesinde yol gösterici bir role sahip olmasıdır. Belirli bir zemin sınıfı için tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek kuvvetli yer hareketi kaydının seçilebilmesi için de kullanılan kıstaslar jeolojik ve sismolojik şartlara bağlıdır. Deprem büyüklüğü, faylanma tipi, çalışma alanının faya olan mesafesi, yırtılma yönü, yerel zemin koşulları ve kaydın spektral içeriğini bu şartları teşkil etmektedir. Zemin koşullarının kuvvetli yer hareketinin özellikleri üzerinde çok önemli etkileri vardır. Yer hareketleri gevşek olarak nitelendirilen jeolojik formasyonlarda büyütülürken yüksek frekans içeriği soğrulur. Büyütmenin yer hareketi üzerindeki etkileri, genellikle kaydın ivme spektrumunun orta ve alçak frekans bölgelerinde belirgindir. Bu temel esaslar da güvenilir sismik zemin sınıflamanın gerekliliğini ortaya koyarken, yerel zemin koşullarının sismik dalga karakteristiği üzerindeki etkisi ile de hayati önemi artmaktadır. Benzer zemin koşullarını birkaç farklı sınıfta birleştirerek farklı zemin tipleri için karşılaştırma olanağı sunmaktadır.

‘Zeminler neden sınıflandırılır?’ sorusuna özetle aşağıdaki iki temel neden ve görsel (Şekil 3.1) ile anlatılabilir.

1-Zeminler, mühendislik yapılarının deprem yer hareketine olan tepkilerini kestirebilmek için yerel zemin sınıflarına bağlı yerel zemin etki katsayıları kullanılarak hesaplanan tasarım spektral ivme katsayılarını hesaplamak etmek için ve



Şekil 3.1. Zemin tabakalarına ait zemin sınıfları ve tasarım spektrumları üzerinden yapıya etkilerinin basit anlatımı.

2-Deprem istasyonlarına ait veriler ile oluşturulan yer hareketi kestirim (GMPE) denklemlerine olan etkisini belirlemek için sınıflandırılır.

Yoshimitsu F., ve diğ., (2007) çalışmasında ivme-azalım ilişkilerinde tepki spektrumları ile hesaplanan zemin katsayılarını etkin kullanıp (SC-I vb.) kaya/gevşek zemin kısıtlamasını genişletmiş kestirilen tepki spektrumlarını ve spektral ivmenin daha doğru bir şekilde hesaplanacağını önermiştir. Bununla beraber, ampirik yer hareketi tahminlerini hesaplamada HVSR baskın periyotları ve  $V_{S30}$  parametreleri kullanılarak hesaplanan eşitliklerin standart sapmasının daha da azaldığı gözlemlenmiştir. Güncel ve yeni zemin sınıflama şemaları izleyen bölümde sunulmaktadır.

### 3.2. Zemin Sınıflama Şemaları

Uluslararası depreme dayanaklı bina yönetmeliklerine veya bilimsel yayınlarda uygulanan güncel zemin sınıflama şemalarına göre gruplar temelde şu alt bölümlere ayrılmaktadır;

-sıklık ilişkili sınıflama şemaları,

-sıklık ve derinlik ilişkili sınıflama şemaları,

-hibrit sınıflama şemaları.

Sıklık ilişkili sınıflama şemaları temel olarak zemin parametrelerine, dahası yüzeye yakın katmanların 20 veya 30 metrelik üst kısımlarının materyal özelliklerine bağlı iken, sıklık ve derinlik ilişkili sınıflama şemaları sedimanter tabakların daha derin özelliklerini de dikkate almaktadır. Hibrit sınıflamada, yüzeye yakın zemin katmanlarının aynı yoğunluğa fakat farklı derinliğe sahip olması gibi farklılıklar dikkate alınmaktadır. Her bir zemin sınıflama şeması öncelikli olarak sondaj bilgilerinden ve zemin laboratuvar testlerinden gelen bilgilere göre temel alınarak yapılır.

Bunun aksine, zemin sınıflamasında hibrit yöntem, deneysel saha araştırma sonuçlarına dayanarak sıklık ve derinlik ilişkili zemin sınıflama şemalarına göre yapılmaktadır. Buna örnek olarak zemin yüzeyinde alınan mikrotremor ölçümlerinin veya kaydedilen depremlerin analizi verilebilir.

Farklı zemin sınıflama şemalarının ana özellikleri ve kısıtlamaları Tablo 3.1’de özetlenmektedir. Zemin sınıflama şemalarından Geomatrix sınıflama sisteminde, (Geomatrix Consultants, 1993) herhangi bir zemin malzeme parametresini (kesme dalga hızı,  $V_s$ , veya dinamik kayma modülü,  $G_{dyn}$  gibi) dikkate almadan basitleştirilmiş ve özetlenmiş bir şekilde sadece kalınlıklar ve gevşek zeminler için hızlar yer almaktadır.



Tablo 3.1 Farklı Zemin sınıflama şemalarının özellikleri ( $N_{SPT}$ : Standart penetrasyon deney vuruş sayısı,  $G_{dyn}$ : kayma modülü)

	Sınıflama şeması <sup>1)</sup>			
	Sıklık ilişkili		Sıklık ve derinlik ilişkili $v_s, H$	Hibrit $v_s, H$ , gözlemsel veri
	$N_{SPT}$	$V_{S30}, G_{dyn}$		
Dinamik Zemin özellikleri	○	●	●	●
Zemin tabakalarının toplam derinliği	○	○	●	●
Zemin baskın frekansının, $f_n$ tanımlanması	○	○	●	●
Zemin büyütmesinin tanımlanması	○	○	●	●
Zemin sıvılaşmasının tanımlanması	●	○	○	○

● mevcut    ● belirli aralıklarda    ○ mevcut değil

Tablo 3.2’de belirtilen sistemin farklı sınıflama şeması, kaya ve sığ zeminleri daha derin zeminlerden ayırarak verilmiştir. Bu sınıflama şeması bir zemini sınıflandırmak için daha az detaylı zemin bilgisine ihtiyaç duymaktadır ve genellikle ABD’de kullanılmaktadır (Rathje ve diğ., 2003).

Tablo 3.2 Geomatrix sınıflama sistemi

Zemin Sınıfı	Zemin sınıf açıklaması	Yorumlar
A	Kaya*	Zemin derinliği $H < 6$ m.
B	Sığ zemin	Zemin derinliği $H < 20$ m.
C	Derin zemin, dar vadi	Zemin derinliği $H > 20$ m, vadi $< 2$ km genişliği.
D	Derin zemin, geniş vadi	Zemin derinliği $H > 20$ m, vadi $> 2$ km genişliği.
E	Gevşek-yumuşak zemin	$v_s < 150$ m/sn

İzleyen altbölümde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde de kullanılan yerel zemin sınıfları kapsamında sıklık ilişkili sınıflama şemaları karşılaştırılacaktır.

\*Mühendislik Anakayası

### 3.2.1. Sıklık İlişkili Sınıflama

Sıklık ilişkili zemin sınıf şemaları genellikle zemin yüzeyinin belirli derinlik aralıkları için oluşturulmaktadır. Çoğu sınıflama şeması, zemin profil yüzeyinin en üst 30 metresi ile sınırlandırılmaktadır (ör. Ambraseys et al., 1996; Hosser ve Klein, 1983; Içbo, 1997). Hem mekanik (ör. N<sub>spt</sub>) hem de dinamik parametreler ( s dalga hızı  $V_{s,30}$ , kesme modülü,  $G_{dyn}$ ) zemin profilinin 30 metre derinliği sınıflaması için temel kıstas olarak alınır. Tablo 3.3 Ambraseys ve diğ. (1996) ve Hosser ve Klein (1983)'a göre zemin kesitinin 30 metreye kadar olan derinlikleri için  $V_{s,30}$ 'a bağlı sınıflama şemalarının karşılaştırmasını göstermektedir.

Tablo 3.3. Farklı zemin sınıflama şemalarının karşılaştırılması

Zemin sıklığının derecesi	AMBRASEYS <i>et al.</i> (1996)		HOSSER & KLEIN (1983)	
	Zemin sınıfı	Kesme dalga hızı, $v_{s,30}$ [m/sn]	Zemin sınıfı <sup>2)</sup>	Kesme dalga hızı, $v_{s,30}$ [m/sn]
Çok düşük	Çok yumuşak	$v_{s,30} < 180$	Tanımlanmamış	
Düşük	Yumuşak	$180 < v_{s,30} < 360$	A	$v_{s,30} < 400$
Orta	Sıkı	$360 < v_{s,30} < 760$ (800)	M	$400 < v_{s,30} < 1100$
Yüksek	Kaya	$v_{s,30} > 760$ (800)	R	$v_{s,30} > 1100$

Tablo 3.4. Sıklık ilişkili Venezuela deprem yönetmeliği (MDU, 1990)

Zemin sıklığının derecesi	Covenin, 1756-82 (MDU, 1990)		
	Zemin sınıfı	Kesme dalga hızı, $v_{s,30}$ [m/sn]	Tanımlama
Çok düşük	S3	$v_{s,30} < 250$	Gevşek taneli zemin ve/veya yumuşak-orta kohezyonlu zemin, $H > 10$ m.
Düşük	S2	$250 < v_{s,30} < 450$	Orta-yoğun'dan yoğun kum ve çakıl, sıklıdan çok sıkıya kum veya killer
Orta	S1	$300 < v_{s,30} < 700$	Sert ve yoğun zemin, $H < 50$ m.
Yüksek	S1	$v_{s,30} > 750$	Kaya

<sup>2)</sup> A – alüvyon, M – orta, R – kaya

Tablo 3.5. 1997 Uniform Building Code'a göre zemin sınıflaması (ICBO, 1997)

Zemin sınıfı	Zemin sınıf tanımlaması	Yüzey profilinin üst 30m'si için ortalama zemin özellikleri		
		Kesme dalga hızı, $v_{s,30}$ [m/sn]	SPT, $N$ [vuruş/ft]	Drenajsız kesme dayanımı, $u_s$ [kPa]
A	Sert kaya, Yalnız doğu ABD zeminleri için	> 1500	<i>Uygun değil</i>	<i>Uygun değil</i>
B	Kaya	760 – 1500	<i>Uygun değil</i>	<i>Uygun değil</i>
C	Çok yoğun toprak ve yumuşak kaya	360 – 760	$N \geq 50$	$u_s \geq 100$
D	Sıkı zeminler	180 – 360	$15 \leq N \leq 50$	$50 \leq u_s \leq 100$
E	3 m'den fazla killi yumuşak zemin, plastisite indisi $PI > 20$ , nem içeriği $w > 40\%$	< 180	$N < 15$	$u_s < 50$
F	Sahaya özel değerlendirmeler gerektiren zeminler: 1. dinamik yüklere karşı zemin hasar görebilirliği, e.g. sıvılaştırılabilir zeminler, hassas killer, zayıf çimentolanmış zeminler. 2. bataklık ve/veya organik killer: 3m den fazla tabakalı. 3. Yüksek esnekliğe sahip killer: 8 m den kalın tabaklı, $PI > 75$ . 4. Çok kalın sert killer: 36 m'den fazla tabaklı.	<i>Belirtilmemiş</i>	<i>Belirtilmemiş</i>	<i>Belirtilmemiş</i>

Sıklık ilişkili zemin sınıflama şemaları aynı zamanda birçok uluslararası depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerince uyarlanmıştır (örnek olarak ABD ve Venezüella). Venezüella zemin sınıflaması (Tablo 3.4), 30m lik zemin tabakası için deprem yönetmeliğinde (MDU, 1990) yalnız  $V_{s30}$  'a bağlı iken ABD (ICBO,1997) zemin sınıflaması (Tablo 3.5) hem  $V_{s30}$  hem de standart penetrasyon dayanım deneyi olan  $N_{spt}$  'ye bağlıdır.

Tablo 3.6 TBDY 2018 Yerel Zemin Sınıfları

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$V_{S30}$	$(N60)_{30}$ [darbe /30 cm]	$(Cu)_{30}$ (kPa)
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ( ) içeren profiller u 25 kPa c □	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ( $PI > 50$ ) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Deprem etkisi altında bina temellerinin tasarımı, yerel zemin sınıflarının tanımlanması ve istinat yapıları ile şevlerin analizlerinde kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesinde, deprem tasarım spektrumlarının tanımlanmasında esas alınacak yerel zemin sınıfları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY, 2018) göre Tablo 3.6 da gösterilmektedir. ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE olarak tanımlanan diğer yerel zemin sınıflarının belirlenmesi için, bu sınıflara ilişkin özellikler Tablo 3.6.'ın diğer satırlarında verilmiştir. Tablo 3.5 ve 3.6'e göre F ve ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması zorunludur.

### 3.2.2. Sıklık ve derinlik ilişkili sınıflama

Sıklık ilişkili zemin sınıflama şemaları üst katmanlarla sınırlandırıldığından (örn. 30 m) toplam sediman kalınlığının zemin büyütmesi üzerinde etkisi belirlenmemektedir. Yer hareketinin genliği özellikle zeminin doğal periyodunu,  $T_s$ , kontrol eden toplam sediman kalınlığından ( $H$ ) ve zemin malzemesinin dinamik sıklığından ( $V_{s30}$  ve yoğunluk ile ifade edilen) etkilenmektedir.

Belirli derinlikteki yeraltı ve jeolojik kesitleri dikkate alınarak yapılan bir diğer sınıflamada Alman deprem yönetmeliği DIN 4149'dir (DIN, 2002). Bu şema, zemin malzemesini ve anakaya üzerindeki toplam kalınlıklarını ayırt eden iki yönlü bir sınıflamaya dayanmaktadır. Zemin malzeme çeşitleri üç farklı zemin koşulu için Tablo 3.7 de gösterilmektedir. Jeolojik alt sınıflar (A, B, C) jeolojik yeraltı koşullarını, dolayısıyla örtü tabaka kalınlığını dikkate almaktadır.

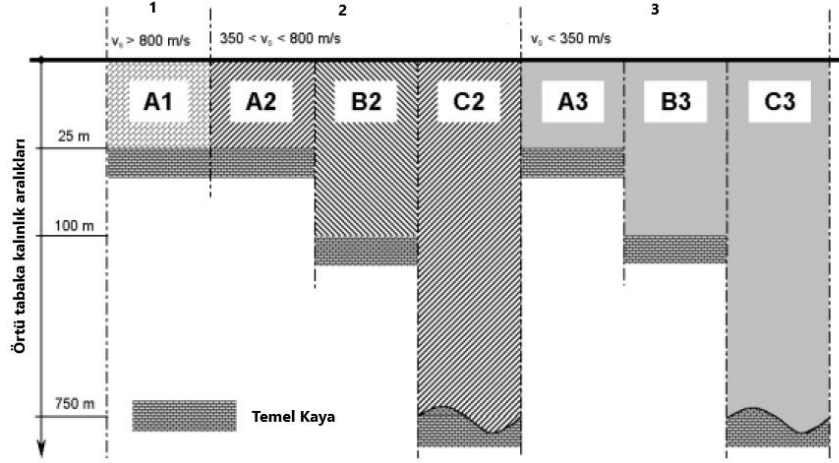
A sınıfı, en yüksek 25 metre sediman örtü kalınlığı ile temsil edilirken C sınıfı daha derin ve çoğunlukla 100 ile 1000 metre derinliğe ulaşan Kuvarterner alüvyon tabakaları temsil etmektedir.

Tablo 3.7. Farklı zemin koşullarının Alman deprem yönetmeliğine göre tanımlanması, DIN 4149 (DIN, 2002)

Zemin sıklığının derecesi	DIN 4149 (DIN, 2002)		
	Zemin koşulları sınıfı	Kesme dalga hızı, $v_s$ [m/sn]	Tanımlama
Düşük	3	$v_s < 350$	İyi taneli zemin (makul kumlar)
Orta	2	$350 < v_s < 800$	Gevşek zemin (çakıldan iridaneli kumlara, kireçli toprak)
Yüksek	1	$v_s > 800$	Katı orta-sıkı zemin

B sınıfı, 25 ve 100 metre sediman kalınlığı olan daha sığ basen yapısını temsil etmektedir ve A ve C sınıfları arasındaki geçiş bölgesini oluşturur. Almanya'nın deprem bölgelerine ait jeolojik koşullar, farklı jeolojik zemin sınıfları için bazı olası durumları temsil etmektedir. Sahaya özel yeraltı sınıfları olarak kabul edilen bu yedi durum Şekil 3.2 de gösterilmektedir. Bu zemin profillerinin, toplam zemin derinliğinin

hemen hemen homojen malzeme sıklığı ile idealize edildiği vurgulanmaktadır (Schwarz ve diğ., 1999).



Şekil 3.2 Sahaya özel yer altı zemin sınıflarının olası kombinasyonları, Alman deprem yönetmeliğine göre DIN 4149 (DIN, 2002, Lang ve diğ., 2003)

### 3.2.3. Hibrit (Melez) Sınıflama

Sıklık ilişkili zemin sınıflamalarının kısıtlamaları göz önünde bulundurulduğunda, yerel zemin koşulları, tabakaların toplam sediman kalınlıkları dikkate alındığında daha doğru tanımlanabilir. Bununla birlikte, her iki sınıflama yer malzemesinin jeoteknik bilgisine dayanmaktadır. Dolayısıyla veriler jeoteknik (sondaj) veya sismik yöntemlerle (kırılma/yansıma) elde edilmektedir. Ayrıca zaman ve masrafa neden olmaktadır. Dolayısıyla, konvansiyonel (geleneksel) prosedürlere dayanan güvenilir sismik zemin değerlendirmesi yalnızca yerel yeraltı koşullarına ait yeterli bilgi haiz olduğunda gerçekleştirilebilir. Bu sebeple, zemin baskın frekanslarını,  $f_s$ , ayırt edici ek bir özellik olarak dikkate alan hibrit zemin gruplama yöntemleri geliştirilmiştir. Böylece jeoteknik yeraltı bilgisi olmayan yerlerde bile, yer tepki analizlerinden elde edilen ve yüzeyde ölçülen sismik verilerden elde edilen zemin baskın frekansları ve hesaplanan zemin transfer fonksiyonları alternatif bir sınıflama oluşturmak için gerçekleştirilmiştir.

Hem sıklık hem de derinlik ilişkili zemin sınıf şemalarının özelliklerini yansıtan yeni bir örnek olarak hibrit zemin sınıflaması Bray ve Rodríguez-Marek (1997) tarafından

sunulmuştur. Önerilen bu sınıflamada, 1997-UBC (ICBO, 1997) şemasını izleyen sınıflama Tablo 3.8 de özetlenmektedir. Bu sınıflama ilk olarak 1997-UBC şemasını farklı yeraltı derinliklere, H, ait altsınıflara bölmektedir. Zemin gruplarının daha ileri alt sınıflara ayrılması, çökel tabakaların yaşlarını (Holosen ve Pleistosen) ve kohezyon durumlarını dikkate alınarak yapılmıştır. Zemin hakim frekansı için belirlenen frekans bandı Vs ve H 'a bağlı teorik hesaplamalar sonucu olarak belirlense de aletsel tabanlı zemin sınıflama teknikleri geliştirilebilir. Lee ve diğ., (2001), Zhao ve diğ., (2006) ve Di Alessandro ve diğ., (2012) (Tablo 3.9) kuvvetli yer hareketi istasyon yerleri için tepki spektrum şekillerini ve deprem kayıtlarının HVSR'si kullanarak hibrit zemin sınıflaması için pratik bir uygulama geliştirdi.

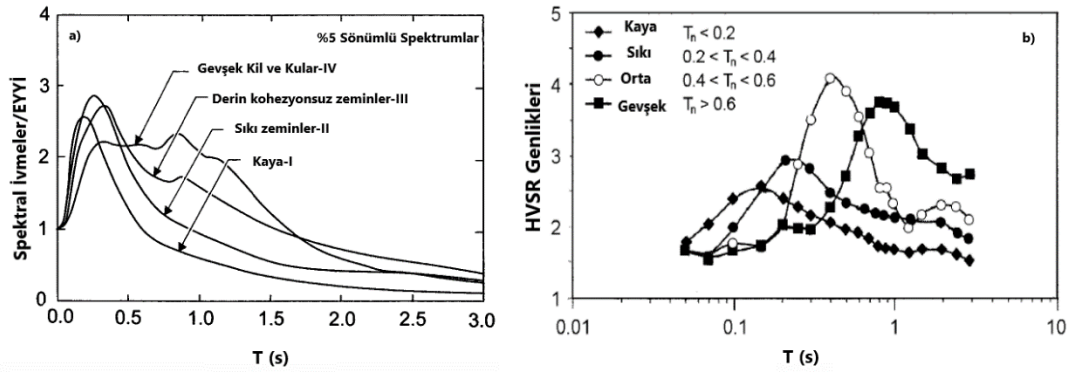
Spektrum bazlı sınıflama önerisi ilk olarak tepki spektrumlarının kategorizasyonu Seed ve diğ., (1976) tarafından (Şekil 3.3a) elde edilen ortalama spektral ivme biçimleri kullanılarak yapıldı. HVSR analizleri ise Japon yönetmelik koduna göre sınıflandırıldı (Japan Road Association, 1980). Zemin hakim periyodu,  $T_s$ , için dört farklı periyot aralığı Şekil 3.3b'de gösterilmektedir.

Şekil 3.4'de Di Alessandro C., (2012) çalışmasında Avrupa'nın en geniş deprem istasyon ağına sahip İtalya için önerdiği baskın periyot bazlı zemin sınıflamasında Japon Periyot bandına ek olarak iki farklı kriter daha eklemiştir. Siyah kalın çizgiler ortalama HVSR eğrilerini gösterirken mavi gölgeli kısımlar tanımlanan zemin sınıfı aralığına işaret etmektedir. 214 istasyonda tespit edilen 602 deprem kaydı ile gerçekleştirilen bu çalışma çok daha fazla istasyon ve deprem kaydı ile Türkiye deprem istasyon ağı için yapmış olduğumuz çalışmaya ilham kaynağı olmuştur.

Tüm ülkenin deprem bölgesi varsayıldığı ve üç ana zona bölünmüş Japon deprem yönetmeliğinde (Kuramoto, H., 2006) zemin etki faktörleri I, II, III, IV grupta olmak üzere zemin sınıflaması zemin karakteristik periyotlarına göre zemin sınıfları oluşturulmuştur (Tablo 3.10).

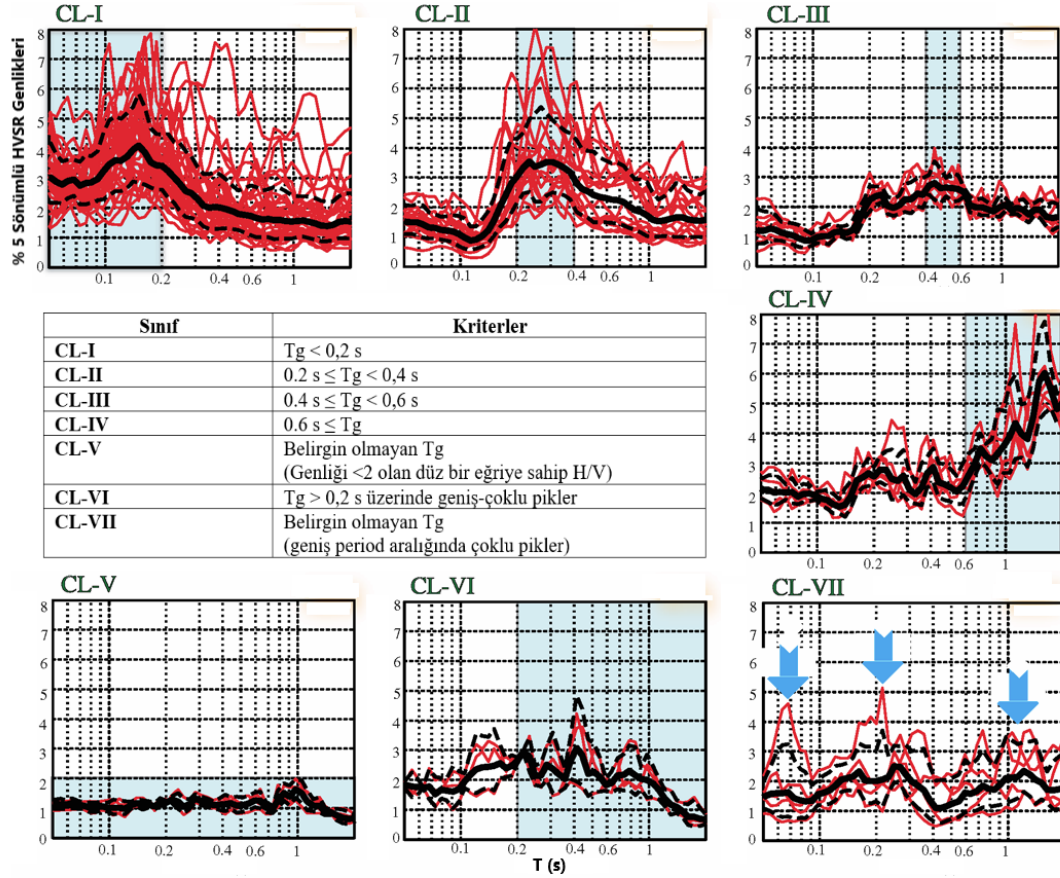
Tablo 3.8 1997-UBC (United Building Code) baz alınarak yapılmış zemin kategorileri basitleştirilmiş hibrit zemin sınıflaması (Bray ve Rodríguez-Marek, 1997; tablo Rodríguez-Marek ve diğ., 2001'den yeniden türetilmiştir).

Saha	Saha sınıflama tanımı	Zemin baskın frekansı, $f_s$ [Hz]	Yorumlar
A	Ana Kaya	$\geq 10.0$	Sert, kuvvetli, sağlam kaya: $v_s > 1500$ m/s.
B	Kaya	$\geq 5.0$	Çoğunlukla "ayrışmamış" California kaya durumları: $v_s \geq 760$ m/s or $H < 6$ m
C-1	Aşınmış/gevşek kaya	$\geq 2.5$	Aşınma zonu: $H = 6 - 30$ m; $v_s > 360$ (700) m/sn
C-2	Sıg sıkı zemin	$\geq 2.0$	Zemin derinliği: $H = 6 - 30$ m.
C-3	Orta derinlikli sıkı zemin	$\geq 1.25$	Zemin derinliği: $H = 30 - 60$ m.
D-1	Holosen yaşlı derin sıkı zemin ya da kum veya kil	$\geq 0.7$	Zemin derinliği: $H = 60 - 200$ m. Düşük tane içeriğine sahip kum ( $< 15\%$ ) veya plastik olmayan taneler ( $PI < 5$ ). Yüksek tane içeriğine sahip ( $> 15\%$ ) ve ( $PI > 5$ ).
D-2	Pleistosen yaşlı derin sıkı zemin ya da kum veya kil	$\geq 0.7$	Zemin derinliği: $H = 60 - 200$ m.
D-3	Çok derin sıkı zemin	$\geq 0.5$	Zemin derinliği: $H > 200$ m.
E-1	Orta derinlikli gevşek kil	$\geq 1.4$	Kil tabakasının kalınlığı: $H = 3 - 12$ m.
E-2	Derin gevşek kil tabakası	$\geq 0.7$	Kil tabakasının kalınlığı: $H > 12$ m.
F	Özel, örneğin. Sıvılaştırma potansiyeline sahip kum veya bataklık	$\approx 1.0$	Holosen yaşlı sıg su tablası seviyesine sahip ( $z_w < 6$ m) gevşek kum veya organik bataklık



Şekil 3.3. Normalize edilmiş tepki spektrumu (a) ve HVSR spektral oranları (b) Lee ve diğ., 2001 tarafından önerilen hibrit zemin sınıflaması için (şekiller (a) Seed ve diğ., 1976 ve (b) Lee ve diğ., 2001)'den alınmıştır).





Şekil 3.4. Di Alessandro C., (2012) önerdiği zemin sınıflama HVSR eğrileri

Tablo 3.9. C., Di Alessandro C., (2012)'nin önerdikleri periyot bazlı sınıflama

Sınıf	Kriterler	Açıklama
CL-I	$T_g < 0,2$ s	Ana Kaya
CL-II	$0,2$ s $\leq T_g < 0,4$ s	Sert Zemin
CL-III	$0,4$ s $\leq T_g < 0,6$ s	Orta-Sert Zemin
CL-IV	$0,6$ s $\leq T_g$	Gevşek Zemin
CL-V	Belirgin olmayan $T_g$ (Genliği $< 2$ olan düz bir eğriye sahip HVSR)	Anakaya'ya eşdeğer bir zemin
CL-VI	$T_g > 0,2$ s üzerinde geniş-çoklu pikler	Gevşek Zemin
CL-VII	Belirgin olmayan $T_g$ (geniş period aralığında çoklu pikler)	Sınıflanamayan zemin

İlgilenen noktadaki Mikrotremor (titreşimcik) ölçüleri ile elde edilen karakteristik zemin baskın periyotlarına bağlı bu sınıflamaya, zemin tabakalarına ait kalınlık bilgileri de ampirik olarak eklenerek hibrit bir hale getirilmiştir.

Tablo 3.10. Periyod tabanlı Japon zemin sınıflaması

Zemin sınıfı	Ts, Baskın periyotlar (s)	H (kalınlık, m)	Tanımlama
I	0.1-0.2 s	$h < 5$ m	Kaya, çok sıkı ve sert, kumlu ve çakıllı zemin olup Tersiyer veya daha yaşlı
II	0.2-0.4 s	$h > 5$ m	Kalın sıkı dilüvyal zemin
III	0.4-0.8 s	$5 < h < 30$ m	Gevşek alüvyon zemin
IV	>0.8 s	$h > 30$ m	Yumuşak zemin

Hibrit veya melez sınıflamalarda esas teşkil eden durum, tüm deprem yönetmeliklerinde ortak olan fakat aynı zamanda farklı kabuller ile belirlenen elastik tasarım spektrumlarının köşe periyodlarının belirlenmesinde zemin doğal titreşim periyodlarının kullanılmasıdır. Her bir zemin türü için belirlenen yerel zemin etki katsayıları böylece geliştirilip daha güvenilir hale getirilebilir. TDBY, (2018) yönetmeliğinde de belirtildiği gibi, özellikle sahaya özel deprem spektrumlarının belirlenmesinde, her bir spektral periyot için yüzey ve tabadaki spektral oranları ile ilgili periyot için yerel zemin etki katsayıları tanımlanabilir.

Farklı zemin sınıf şemaları dikkate alındığında, aletsel veriler kullanılarak yapılan karşılaştırma ve kontrol etme amaçlı çalışmalar daha güvenilir olduğu söylenebilir. Deneysel tabanlı zemin sınıflamalarının güvenilirliği öncelikle yerel yeraltı koşulları hakkında kaliteli ve yeterli bilgiye bağlıdır. Daha öncede belirtildiği gibi, yerel zemin koşulları ile ilgili detaylı bilgi, zemin büyütme özelliklerinin hesaplanmasında önemli bir yere sahiptir ve sismik hareketlere bağlı potansiyel zararların azaltılmasına ışık tutmaktadır. Bu bağlamda, izleyen bölümde olarak veri seti ve analizi anlatılarak bu tez kapsamında sismik zemin sınıflaması için Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi istasyon ağı için önerilen yaklaşım ve mevcut  $V_{S30}$  tabanlı sınıflama ile karşılaştırılması yapılarak irdelenecektir.

#### 4. VERİ SETİ VE İŞLENMESİ

Sismik aktivitenin yüksek olduğu Alp-Himalaya kuşağı hinterlandını oluşturan ülkeler arasında, Hindistan ve İtalya'dan sonra en geniş deprem istasyon ağına sahip ülke olan Türkiye, Aralık 2020 itibari ile 792 ivmeölçerden oluşan kuvvetli yer hareketi istasyonuna sahiptir. Özellikle 1999 Kocaeli depreminden sonra istasyon ağını ve dijital veri akış sistemini geliştiren Türkiye, sayısal olarak işlenmeye hazır yüzbinlerce hız ve ivme deprem kaydına sahiptir.

Aletsel dönem kayıtlarının analiz edildiği bu tez çalışması kapsamında elli bin üç yüz seksen dokuz (50389) veri ile çalışılmıştır. Temel eleme kriterleri ile otuz üç bin iki yüz kırk dörde (33244) indirilen veri sayısı sonrasında detaylı analiz ile 701 istasyonda on altı bin yüz kırk yedi (16147) veri ile spektral sonuçlar üretilmiştir. İş yükünün büyük bir zamanını teşkil eden meşakkatli ve sabır gerektiren veri okuma kısmı yaklaşık iki yılda tamamlanmıştır. Kesme dalga fazlarıyla yapılan analizlerde otomatik pikleme girişimleri de denenmiş fakat kesme dalga fazlarının başlangıç ve bitiş kısımlarını belirlemede var olan çeşitli algoritmalar yeterli, güvenilir ve tutarlı yanıtlar verememesinden ötürü bu işlemler manuel olarak icra edilmiştir.

Bir istasyonda kaydedilen tüm depremlerin eleme kıstasları ve sinyal-gürültü oranı görece yüksek verilerden ortalama spektral şekiller üretildiği için, istasyonda en az üç deprem kaydedilmiş olması dikkate alınmıştır. Ayrıca İstasyonlar aktif fay sistemlerine göre beş bölgeye ayrılarak da incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Veriler değerlendirilirken tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretmek adına aynı eleme kriterleri ve sinyal analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden öncelikli kıstas istasyonda kaydedilen depremlerin yakın alan olarak nitelendirilen yüz elli (150) km'den az episantr uzaklıklarına sahip olmaları gerekmektedir. Bu bölümü takip eden alt bölümlerde eleme kriterleri, veriseti, hesaplama yöntemleri, karşılaştırmalar ve

analizler irdelenecektir. Bu kapsamda veri analiz, hesaplamalar ve çizimler Matlab (R2015b) akademik versiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1. Analize Tabi Tutulacak Deprem Verilerinin Eleme Kıstasları

Temel eleme kriterleri olarak adlandırılan faz okuması yapılacak olan deprem sinyalinin;

1-Yakın alan olması yani episantr uzaklığının (R) 150 km'den az olması (R<150 km)

2-Deprem büyüklüğünden farklı olarak ölçülen en yüksek yer ivmesi (EYİ) değerlerinin 0,5 ile 100 gal arasında olması,

3-İstasyonda en az üç sığ derinliklere ait (<30 km) deprem kaydının var olması

şeklinde üç temel husus belirlenmiştir.

Bu temel eleme kıstasların ardından deprem sinyalleri, analizi tabi tutulmadan önce sinyal/gürültü oranlarına (SNR, Eşitlik 4.1) göre de eleme yapılmıştır.

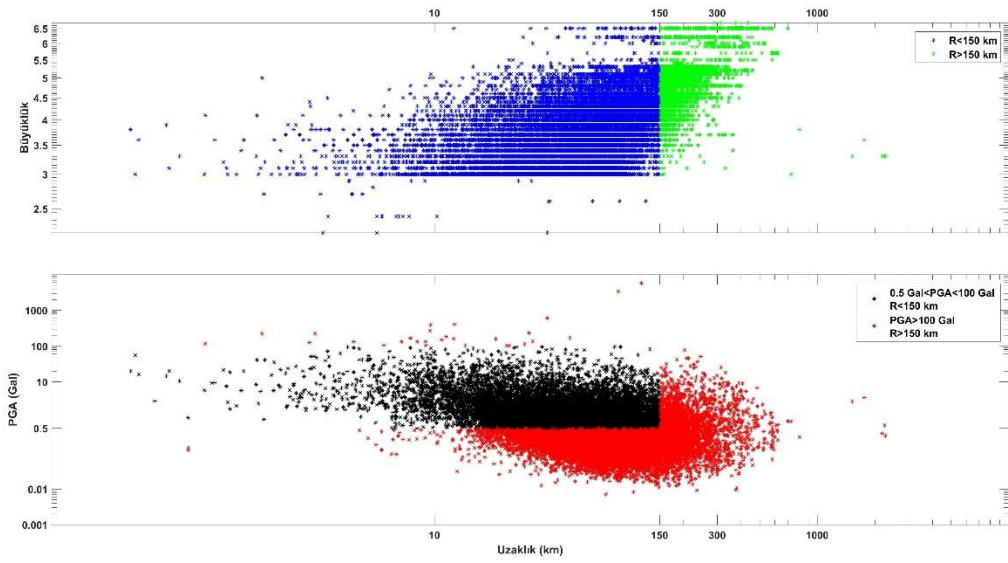
$$\frac{\text{Sinyal}}{\text{Gürültü}} = \frac{\text{rms}(F(\text{sinyal})^2)}{\text{rms}(F(\text{gürültü})^2)} \geq 2 \quad (4.1)$$

Dalga formunda (Şekil 4.6) sinyale ve gürültüye ait spektrumların karekök ortalama düzeylerinin (Eşitlik 4.2) oranı olarak belirtilen sinyal-gürültü oranının iki 'den büyük olma ön şartı konulmuştur. Burada esas olan deprem sinyallerinde belirgin cisim dalga fazlarının gürültü olarak nitelendirilen deprem fazları dışındaki kısa süreli periyodik olmayan (transient-başta ve/veya son koda dalga kısımlarında) gürültü kısımlarından daha kuvvetli ve belirgin olmasıdır. Ayrıca yazılan bilgisayar programında kullanıcının yanlış veya belirgin olmayan faz seçiminde de bu kriter ile eleme yapılmaktadır.

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \quad (4.2)$$

Burada x deprem sinyal genliklerini N de örnekleme aralığına bağlı veri (deprem) uzunluğunu belirtmektedir. Beresnev ve Wen (1996) doğrusal olmayan davranışının

100 Gal üzerinde olan depremlerde başladığını ifade etmektedir. İşleme tabi tutulan kayıtlar 'linear' denilebilecek büyüklük ve ivmeler olduğu için zemin-yapı etkileşimi doğurmayacak veri seti üzerinde çalışıldı. Linear (doğrusal) diye nitelendirilen kayıtlar en yüksek yer ivmesi 0.1g'den ( $1g=981$  Gal) az olan kayıtlardır. Doğrusal olmayan zemin davranışlarından kaçınmak için  $EY\dot{I}<100$  Gal eleme kriteri olarak kullanıldı. Bununla birlikte, HVSR'yi uzun dalga boylarında etkileyen bir diğer faktör olan düşük SNR'li kayıtlar küçük depremlerde gözlenmektedir. Bu yüzden  $EY\dot{I}<0.5$  Gal'a ait kayıtlar düşük kalitede sinyal ürettiği için analizlerde kullanılmamıştır.

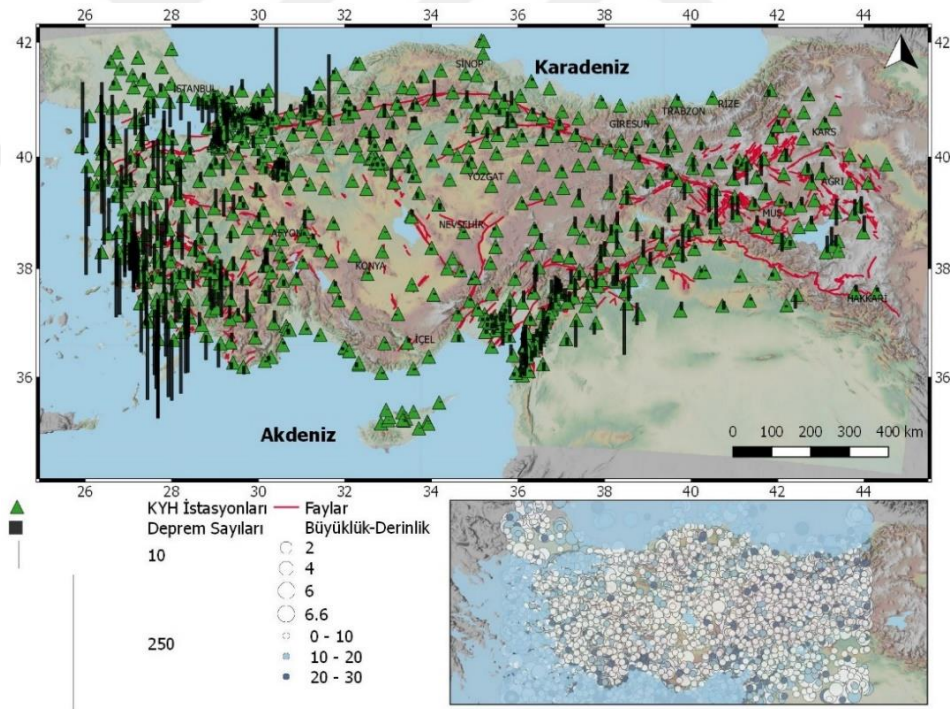


Şekil 4.1. İstasyonlarda kaydedilen tüm depremlerin episantr uzaklığının bir fonksiyonu olarak en yüksek ivmelerine ve büyüklüklerine göre gösterimi

Şekilde 4.1 (üst) mavi noktalar yakın alan ( $R<150$  km) yeşil noktalar ise uzak alan ( $R>150$  km) 2004-2020 arasında kaydedilen yaklaşık elli bin depremin büyüklüklerine göre dağılımını göstermektedir. Altta grafikte ise siyah noktalar 0,5 Gal ile 100 Gal arasındaki depremleri, kırmızı noktalar ise 100 Gal'den büyük 0.5 Gal'den küçük ve  $R<150$  km olan depremleri göstermektedir. Tepki spektrum analizlerinde kullanılan veri setinin seçimi için çizilen bu grafikte mavi ve siyah veriler kullanılmıştır. Deprem sayıları büyüklüğü 3 ve 5 arasında olan olaylarda yoğunlaştığı görülebilmektedir. Büyüklük ve uzaklık arasında pozitif bir korelasyon olduğu söylenebilir. Şekil 4.1 (alt), ham (raw) en büyük yer ivmelerinin uzaklıkla azalan bir eğilim sergilediği gözlenebilmektedir.

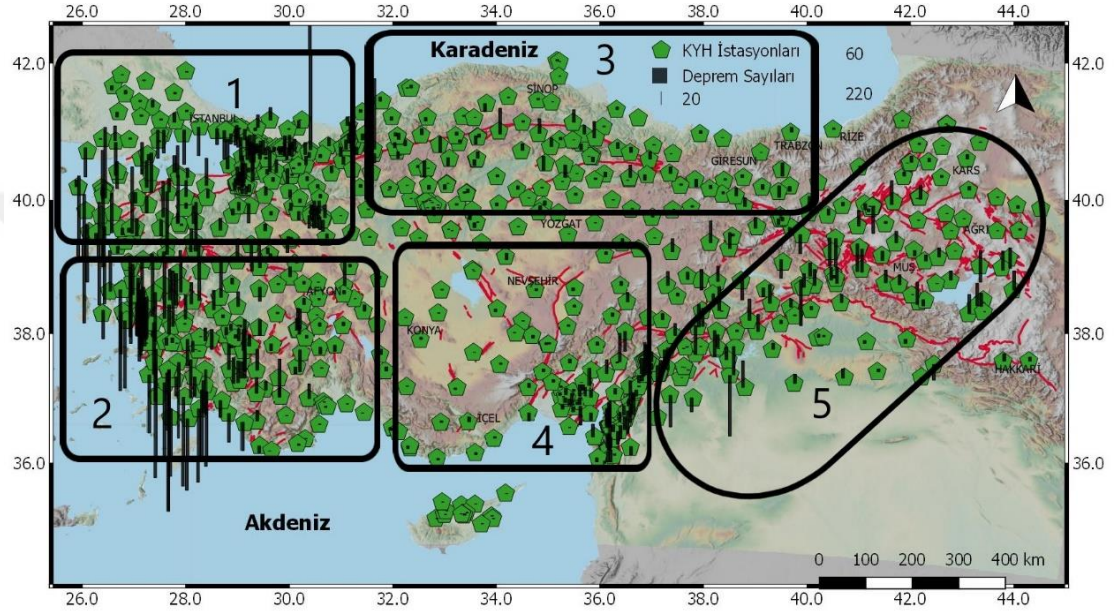
#### 4.1.1. TR-KYH Gözlem Ağına Ait İstasyonlarda Elde Edilen Sayısal Bilgiler

Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi istasyon ağında kaydedilen depremler jeofizik ve geoteknik verilerle sistematik olarak il defa Akkar ve diğ. (2009) çalışmasında analiz edilerek sismolojik parameteler hesaplanarak teste tabi tutulmuş ve sonuçlar diğer ağlarda kaydedilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Diğer yandan Ağ'da kaydedilen ivme kayıtları ile yapılan sismik tehlike çalışmaları Ağ'ın gelişimini desteklemesinin yanısıra sismik olarak aktif Doğu Marmara bölgesi özelinde nitelik ve karşılaştırılabilir deneysel sonuçlar üreterek gelecek çalışmalara ışık tutmaktadır (Gülkan ve diğ., 2002; Ulutaş ve diğ., 2010; Özel ve diğ., 2004; Ulutaş ve diğ., 2011). Tez çalışmasına ait tüm haritalar açık kaynak kodlu coğrafi bilgi sistemleri tabanlı Qgis 2.18 (Qgis Dev. Team, 2009) programında hazırlanmıştır. Şekil 4.2'de istasyonların aletsel dönemin özellikle son yıllarında yekûnu oluşturan deprem kayıtları detaylı olarak resmedilmektedir.



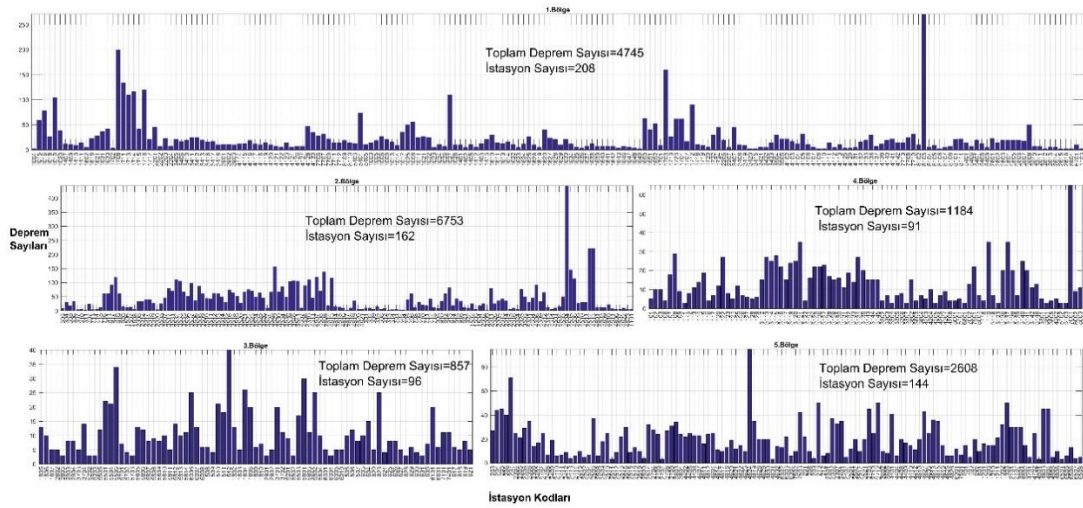
Şekil 4.2. Yeşil üçgenler istasyonları temsil ederken, üzerlerinde resmedilen siyah çubuklar kayıt ettikleri deprem sayısını göstermektedir. Sağ alttaki haritada depremlerin büyüklüklerine göre daire boyutları ölçeklendirilmiş olup renkleri de derinlik bilgisini göstermektedir.

Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi depremlerin ekseriyeti tektonik rejimin doğrultu atımlı ve normal faylanma mekanizmalarınca kontrol edildiği (Kuzey Anadolu Fay sistemi (KAF), Batı Anadolu Horst-Graben sistemleri, Doğu Anadolu Fay sistemi(DAF)) bölgelerde yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum bizi Deprem yoğunluğu esas alınarak Ulusal ağın sismik aktivitesinin yüksek olduğu bölgeler oluşturulup istasyonların o yönde tasniflenmesinin araştırılması da yapılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Zemin sınıflaması için TR-KYH istasyonlarının beş bölgeye ayrılmasını gösteren harita

Şekil 4.3’de belirlenen edilen bölgelere ait toplam istasyon ve deprem sayıları Şekil 4.4’deki histogramda gösterilmektedir. 2.Bölge olan Batı Anadolu ve hinterlandı sismik olarak en aktif zon olduğu görülmektedir. İstasyon sayıları da bu nispette diğer bölgelere göre daha fazladır. 3.Bölge olarak nitelendirilen Orta Anadolu ve KAF’ın orta kolu diğer bölgelere nazaran daha az istasyona sahip olmakla birlikte sismik olarak da daha suskundur.



Şekil 4.4. Bölgelere ait toplam istasyon ve deprem sayıları

1. Bölgede ki özellikle Çanakkale civarı istasyonlarına ait analiz edilen kayıtların yüksek olması 24.05.2014'de Gökçeada açıklarında meydana gelen artçılardan kaynaklanmaktadır. 3.Bölgede gözlenen istasyonların kayıt ettiği ve analize tabi tutulan deprem sayılarına bakıldığında bölgenin tektonizmasına bağlı daha homojen bir dağılım görülebilmektedir. 4.Bölgede de özellikle Ölü Deniz Fay aktivitesinden kaynaklı Hatay ve civarında sismik aktivite göze çarpmaktadır.

Sonuç olarak eleme işlemleri ve analizler için yazılan programda, süreç temel şu üç başlıktaki gibi işlemektedir;

1-Deprem kayıtlarının toplu okunması ve belirli depremlerin seçilmesi

2-Sinyal üzerinden analiz edilecek kısımlarının seçimi ve güç yoğunluk spektrumuna dayalı Sinyal/Gürültü oranlarının hesaplanması

3-Hesaplanan sonuç ve grafiklerin dosyalara yazdırılması.

Bir sonraki alt başlıkta deprem kayıtlarına uygulanan ver işlemler irdelenecektir.



## 4.2. Deprem Sinyallerinin Zaman Ortamı Veri İşlemi

Bilindiği üzere KYH kayıtçıları ivmeölçerlerden oluşmaktadır ve kayıtlar  $\text{cm/sn}^2$  (Gal) cinsinden elde edilmektedir. Özellikle Güralp tipi sismometreler yer hareketini 'counts' şeklinde kaydetmektedirler. Voltaj/m/sn türünden counts değerleri, aletin hassasiyeti (kazanç×normalize) ve deneysel olarak elde edilen sıfır-kutupsal gösterim değerleri (pole-zero) ile temsil edilen alet-transfer fonksiyonunun konvolusyonlarının voltaj değerlerine skaler olarak bölümüdür. Dolayısıyla, alet etkisinin giderilerek gerçek yer hareketi ivme değerlerini ortaya çıkartılmalıdır. Eşitlik 4.3'de bu durum matematiksel olarak ortaya konulmaktadır (URL-2)

$$\frac{V}{x} = G \times A \times H \quad (4.3)$$

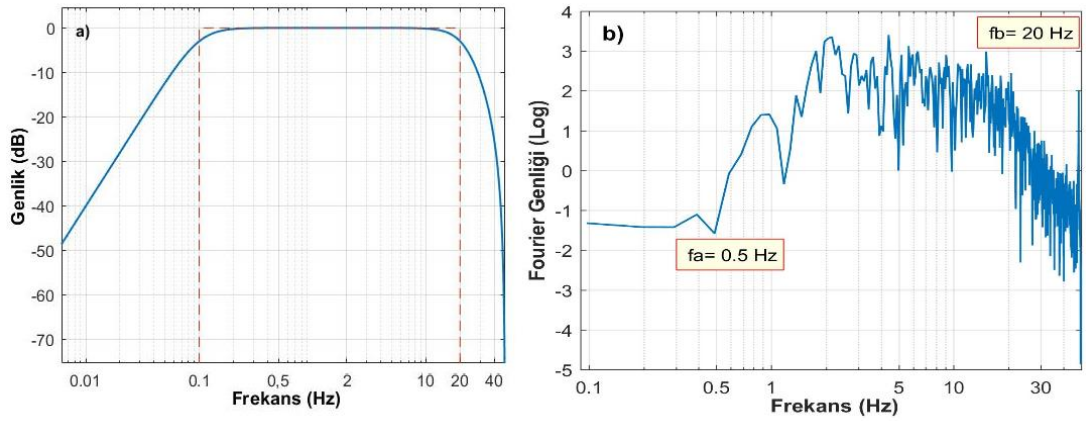
Burada, ölçülen x girdi hareketine karşı üretilen V, voltajı temsil etmektedir. G alet kazancı, A, alet normalize sabiti ve H' de transfer fonksiyonudur. Laplace dönüşümü ile pole-zero ortamındaki transfer fonksiyonunun filtre transfer katsayılarına dönüştürülüp duyarlılık değerlerinin voltaj değerlerinden dekonvole edilmesi ve ham veri ile filtrelenmesi alet tepkisinin giderilmesine yol açar. Ağda bulunan diğer sismometre tipleri (Sara ve Geosis) doğrudan yer hareketi ivmesi olarak veriyi kaydedebilmektedir.

Butterworth sayısal filtresi sismolojide sıklıkla kullanılan sayısal filtrelerden biridir. İngiliz fizikçi Stephen Butterworth tarafından 1930'daki makalesinde (Butterworth, S., 1930) tanımlanan filtre, band geçişli türünde, geçiş bandlarında maksimum düzlük yani sinyale istenilen frekans aralığında optimum yükseltme/alçaltma sağlamaktadır. Konvansiyonel ve mühendislik sismolojisi ile ilgili alanlara çalışan araştırmacılar da bu filtreyi, istenilen frekansları elde etmek isterken geçiş band aralığında türdeş hassasiyet istemelerinden dolayı tercih etmektedirler.

Tez çalışma kapsamında doğrusal ve zamanla değişmeyen (LTI) sistemlere uygulanan sonsuz dürtü yanıtı (IIR) ile tasarlanabilen Butterworth analog dijital filtresi transfer fonksiyonu bilineer dönüşüm ile dijital bir filtreye dönüştürülerek uygulanmıştır. Çift taraflı olarak, istenilen frekans bandı için kutuplar ve sıfırlar (poles-zeros) ortamından

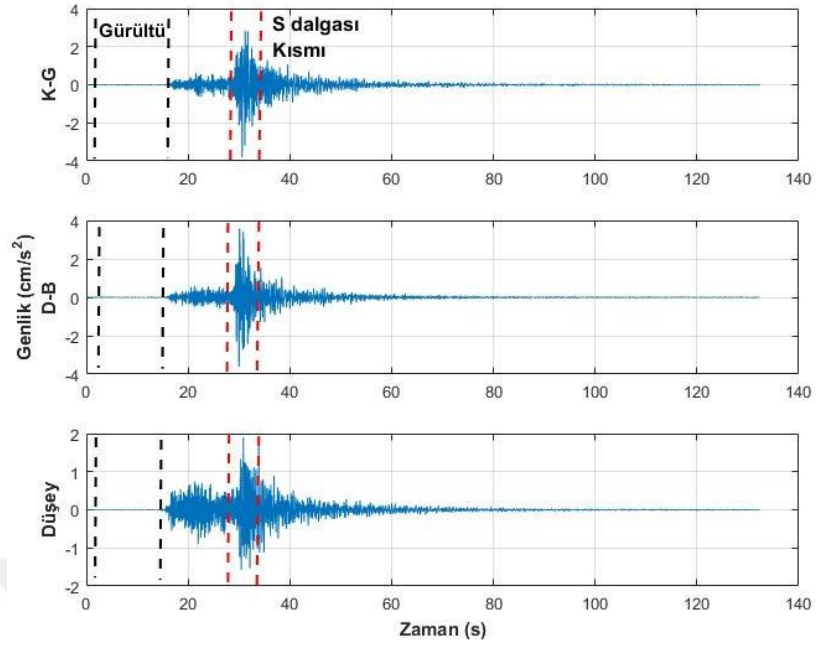
durum uzay formuna dönüştürülen filtre tepki fonksiyonu ile elde edilen süzgeç katsayıları ile sinyal filtrelenir. Şekil 4.5a'da, tasarlanan filtre tepki fonksiyonunun kesme eğimini kontrol eden ikinci dereceden filtre ( $n=4$ ) katsayısı, normalize 0,1-20 Hz kesme frekans aralıkları ve sismometreler için genelde 100 Hz olan örnekleme aralığı ile tasarlanan IIR Butterworth filtresi görülmektedir.

Şekil 4.5b'de ise şekil 4.6'da ki depreme ait K-G bileşeni ham spektrumu görülmektedir. Etkin zemin frekanslarının  $f_a$  ve  $f_b$  band aralığında baskın olduğu belirlenebilmektedir.  $f_b$  ötesindeki yüksek gürültü etkindir ve  $f_a$ - $f_b$  bandlarının filtre işlemlerinde fikir vermesi açısından belirgin bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 4.5. a) Çalışmada için tasarlanan bant geçişli IIR sayısal Butterworth filtresini temsil eden mavi eğri ile bant aralıklarını gösteren kırmızı kesikli çizgiler. b)Etkin yer frekanslarının ham spektrum üzerinden gösterimi

Yakın alan depremler çalışıldığı için mühendislik sismolojisi kapsamında ilgilenilen frekans bandı olan 0,1-20 Hz aralığında süzgeçlenen sinyaller için Butterworth filtresi kullanılmıştır. Kullanıcı tarafından, kesme dalgasının (dS) yayılım paterninden (biçim) dolayı yatay bileşenlerde en iyi şekilde gözlemlenmesine bağlı olarak belirlenen dS fazı ve gürültü kısmına ait örnek Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. 3116 kodlu istasyona kaydedilen 4Mw büyüklüğündeki filtrelenmiş bir deprem sinyaline ait üç bileşen ivme kaydının gürültü ve sinyal kısımları

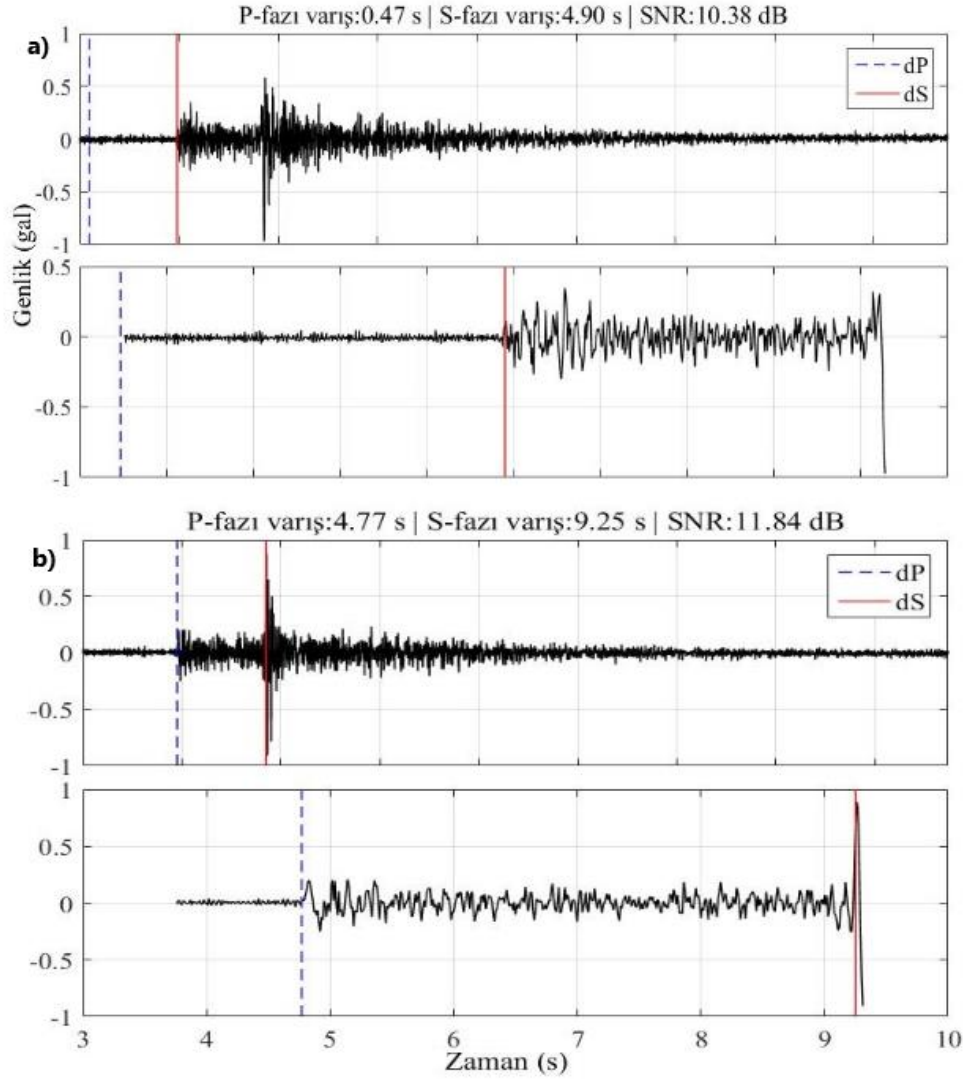
Yakın alan depremlerde cisim dalga fazlarından dS'nin ve onlara ait kodlarının süreleri belirli karakteristik özellikler (dS'ler yaklaşık 7-8 s) sergilemelerine rağmen özellikle EYİ ve magnitüdlere bağlı bu süre artıp veya azalabilmektedir. Bu kapsamda otomatik pikleme algoritmaları varışları belirlese bile dS'nin sönümlenmeye başladığı zamanı belirlemek yine kullanıcıya düşmektedir. Ortalama dS süreleri atansa da bu yaklaşım yaygın enerjisinin büyük bir kısmını taşıyan dS kısmı ivme tepki spektrum çözümlerinde spektral şekilleri etkileyecektir. Bir alt bölümde otomatik pikleme örnekleri incelenecektir.

#### 4.2.1. P Ve S Fazlarının Otomatik Seçimi

Yer hareketi verilerinin işlenmesi, deprem lokasyonlarının saptanması, kaynak mekanizma analizleri ve deprem erken uyarı tespitleri gibi birçok sismolojik uygulamada ilk varışları temsil eden P dalga fazının (dP) varış zamanının tespiti çok önemlidir. Özellikle düşüt sinyal-gürültü oranına sahip verilerde kullanıcı tarafından dP varışları manuel olarak daha doğru belirlenmesine rağmen zaman alıcı ve subjektiflik içermektedir. Birçok araştırmacı (Allen, 1978, 1982; Blandford, 1982;

Baer ve Kradofer, 1987; Ruud ve Husebye, 1992; Tarvainen, 1992; Earle ve Shearer, 1994; Withers, M., 1998; Lomax ve diğ., 2012; Rastin ve diğ., 2013 Kalkan, 2016) istatistiksel yöntemlere dayalı (Otomatik regresyon histogram yöntemi STA/LTA vb.) 1980'lerden bu yana çeşitli dalga fazlarının otomatik olarak belirlenmesinde sayısal yöntemler önermişlerdir. Bu yöntemler genelde enerji değişimi, dalga tanecik hareketlerine bağlı polarizasyonlar ve frekans içeriğindeki değişimlerini incelenmesine dayanır. Bu yaklaşımlarda, dalga genelde gürültüyü azaltmak ve sinyali kuvvetlendirmek için filtrelendirilir. Bu yaklaşımlar arasında uzlaşılan bir yöntem olan kısa dönem ortalama ve uzun dönem ortalama oranları (STA/LTA) en çok kullanılan yaklaşımdır. STA/LTA algoritması uzun ve kısa pencere süreleri belirlenerek atanan bir eşik değeri için sismik gürültü veya sinyalin mutlak genliklerinde sürekli değişimleri inceler. Örneğin, mikrotremorlerdeki ani pikleri de deprem sinyali gibi algılaması yöntemin dezavantajlarından biridir.

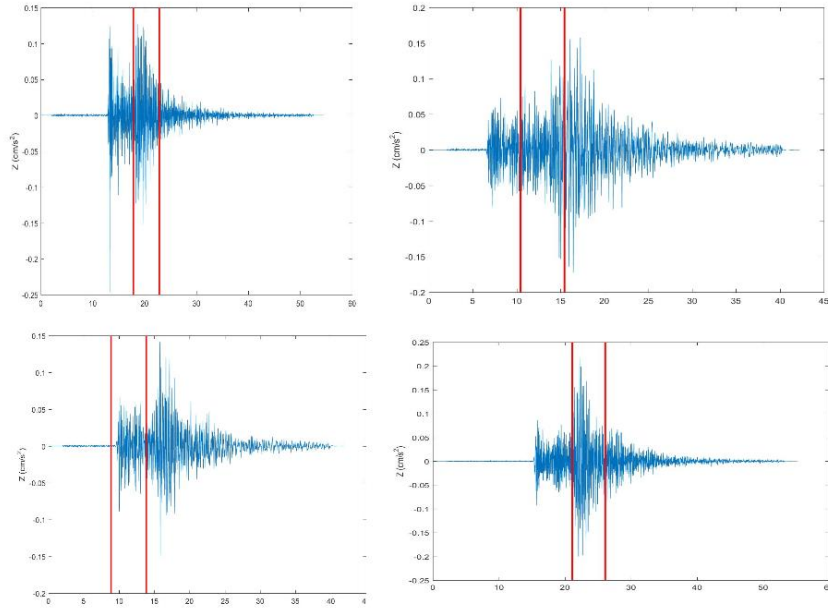
Tez çalışması kapsamında otomatik pikleme için histogram metodu (Solomon ve diğ., 2001; Kalkan, E., 2016) yaklaşımı kullanılarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Histogram yöntemi eşik değeri ve pencere aralığı saptama gibi gereksinimler duymamaktadır. Histogram oluşturmak için deprem sinyaline ait genlikler M adet eşit aralıkları bölünür. Böylece histogram, sinyalin uzunluğuna bağlı histogram boyutuna göre oluşturulur. Maksimum ve minimum genliklere ait tek serbestlik dereceli salınım sönüm enerji değerleri hesaplanarak üst ve alt durum seviyeleri belirlenir. En düşük histogram boyutuna karşılık gelen düşük enerji seviyesi dP fazını işaret ederken dS fazı da aynı yöntemle (URL-3) enerji seviye oranları ve histogram uzunluk aralıkları belirlenerek hesap edilebilir. 4136 kodlu istasyonda 4,1 Mw büyüklüğünde kaydedilen sismograma ait örnekler Şekil 4.7'de verilmektedir.



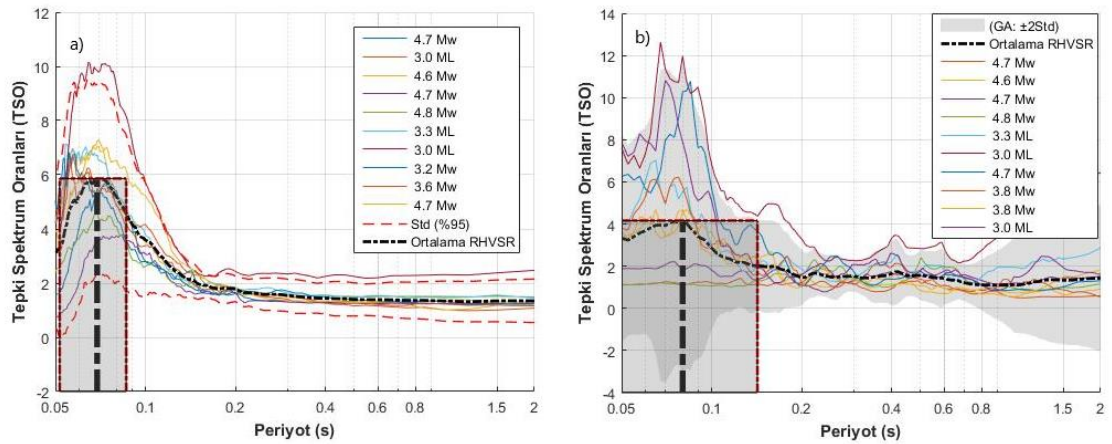
Şekil 4.7. Aynı depremin Doğu-Batı (a) bileşeni ile Kuzey-Güney (b) bileşenlerine ait otomatik faz seçimleri

Şekil 4.7’de aynı depreme ait yatay bileşenlerde histogram yönteminin temel girdi parametrelerinden olan en yüksek genlik enerji seviye oranları ve histogram formunu oluşturan boyut aralıkları değiştirilmeksizin gerçekleştirilen faz varış tespitlerinde farklılıklar görülmüştür. Birçok denemede başarılı olan uygulama Şekil 4.7a’deki bileşende hatalı faz tespitleri de saptanabilmektedir. Yatay bileşenlerden K-G bileşeni dP ve dS varışları sismogram üzerinden de kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Buna nazar D-B bileşenindeki fazlar da kullanıcı tarafından rahatlıkla ayırt edilebilirken SNR oranından kaynaklı farklılıklar neticesinde hatalı faz tespitlerine neden olabilmektedir.

Yaklaşık iki bin deprem üzerinde otomatik pik, yüksek yer ivmelerine ve deprem büyüklüklerine göre belirlenen dS pencere boyutlarına ait denemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen spektral şekillerde hatalı tespitlerin farklı sonuçlar üretebileceği belirlenmiştir. 8111 kodlu Düzce istasyonunda kaydedilen depremlere ait dS kısımlarının otomatik seçimleri Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Otomatik dS kısımları seçimleri



Şekil 4.9. Manuel (a) ve otomatik (b) dS faz ve kısımları için sonuçların karşılaştırılması

8111 kodlu istasyonda analiz edilen 10 depreme ait spektral oranlar ve ortadamarın görüldüğü Şekil 4.9'de, manuel olarak elde seçilen dS kısımları ait (4.9a) ve otomatik olarak belirlenen dS kısımlarına ait baskın periyotlarda çok az farklılık görülse de spektral şekillerde, özelliklerde en büyük genliklerde farklılıklar gözlenmektedir. Bu durum tez çalışmasında spektral şekiller ve baskın periyotlara dayalı zemin sınıfları belirlemede hatalı sonuçlar doğurabileceğinden, sismik dalga fazlarının ve kesme dalgası kısımlarının kullanıcı tarafından titizlikle seçilmesi yoluna gidilmiştir.

#### **4.2.2. Deprem Sinyallerinin Radyal-Tanjansiyel Dönüşümü Ve HVSR Analizlerine Etkileri**

Bu alt başlıkta yatay düzleme ait bileşenlerden (Kuzey-Güney, Doğu-Batı) oluşan sismogramlara sismoloji disiplini içinde sıklıkla uygulanan radyal-tanjansiyel dönüşümünün ivme kayıtları ile yapılan tepki spektrum oran (HVSR-TSO) analizlerine etkisi incelenmiştir. Bu dönüşümün amacı coğrafi koordinat düzleminde bulunan sismometreleri deprem dalga yayılımı doğrultusuna dönüştürmektir. Radyal-tanjansiyel koordinat sistemine dönüşümün amaçlarından biri de P-SV-Rayleigh dalgalarını SH'lardan ayırmaya yardımcı olmasıdır. Özellikle uzak alan depremlerde hız kayıtlarında genlik distorsiyonunu (biçimde meydana gelen bozulma) önlemek amacıyla yapılan bu dönüşüm, yakın alan orta deprem büyüklükleriyle yapılan bu tez çalışması için sınırdır.

Dönüşüm Kuzey ve Doğu bileşenlerinden oluşan dönüşüm matrisinin çarpımı şeklinde uygulanabilir:

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

A dönüşüm matrisini ifade etmektedir. Buradan radyal-tanjansiyel dönüşüm işlemi eşitlik 4.4'deki gibi hesaplanır;

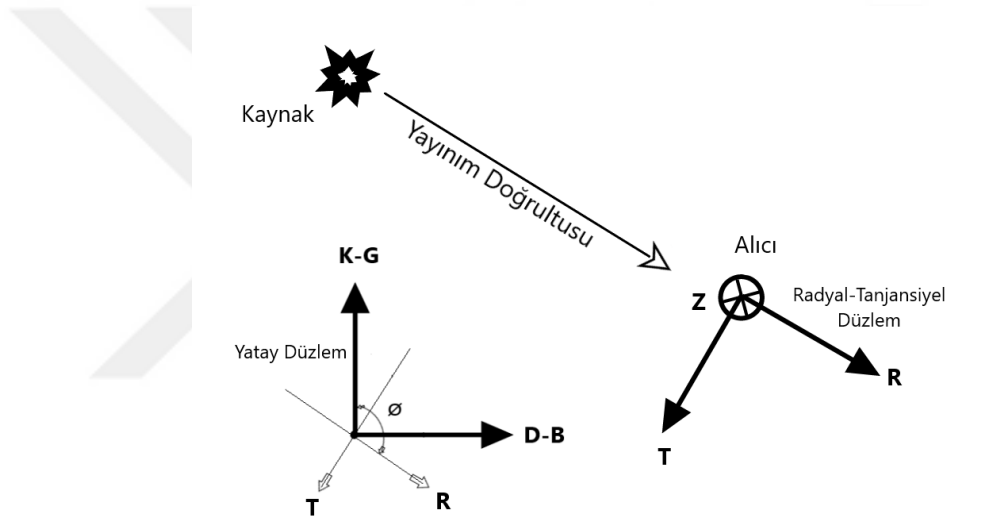
$$\begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} K \\ D \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A:dönüşüm matrisi, K ve D yatay bileşenler R ve T' de radyal-tanjansiyel bileşenleri temsil etmektedir.

$$R(t) = \cos\theta. N(t) + \sin\theta. E(t) \quad (4.4)$$

$$T(t) = -\sin\theta. N(t) + \cos\theta. E(t) \quad (4.5)$$

Burada  $\theta$  deprem merkez üssünden sismometreye (Şekil 4.10) olan azimuta işaret etmektedir. Tüm azimutlar hesaplanarak da eşitlik 4.4 ve 4.5 ile radyal-tanjansiyel dönüşümleri uygulamak için Matlab'de küçük bir fonksiyon yazılarak tüm yatay bileşenler dönüştürüldü.

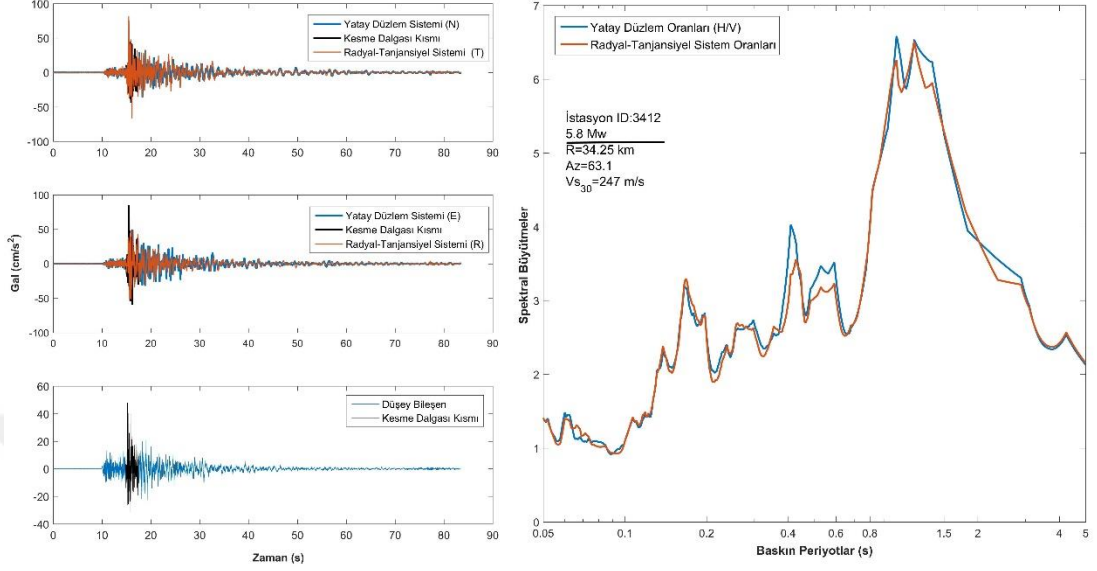


Şekil 4.10. Yatay ve teğetsel düzlemlerin deprem kaynağına göre gösterimi. K-G: Kuzey-Güney, D-B: Doğu-Batı, R:Radyal, T:Tanjansiyel ve Z: Düşey bileşenleri gösterirken  $\theta$  'da yayınım doğrultusuna olan azimutu göstermektedir

İncelenen yirmi istasyona ait yaklaşık 300 depreme ait gerçekleştirilen analizlere ait bir örnek Şekil 4.11'de sergilenmektedir. 26 Eylül 2019 Marmara Denizi- İstanbul (Silivri) açıklarında meydana gelen Mw=5,8 büyüklüğündeki depremin 3412 kodlu istasyondaki kaydı analiz edilerek yatay düzlem ve radyal-tanjansiyel düzlem karşılaştırılması hem sismogramlar üzerinden hem de tepki spektrumları nazarından gerçekleştirilmiştir. Sismogramlarda özellikle dS kısımları sonrası koda dalga



genliklerinde ufak değişimler gözlenmekle beraber tepki spektrum oranları neredeyse aynıdır.



Şekil 4.11. İstanbul depreminin en yüksek yer ivmesini kaydeden istasyonda yatay bileşen dönüşüm sonuçlarının karşılaştırılması, Kırmızı sinyal ve tepki spektrumları radyal-tanjansiyel düzleme ait iken mavi renkteki sonuçlar da yatay düzleme aittir. Sismogramlar üzerindeki siyah bölgeler dS kısımlarını göstermektedir.

Görüldüğü üzere bu iki sistemin spektral oranlarda farklı sonuçlar üretmediği saptanmıştır. Bu sonuçlardan mütevellit, radyal-tanjansiyel sistemine dönüşümünün yakın alan depremlerde yatay düzlemdeki bileşen sonuçları ile farklılık göstermediği açıkça anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yatay bileşenlere radyal-tanjansiyel dönüşümü bu yaklaşımda etkili olmamaktadır ve dönüşümün yakın alan ivme kayıtlarına uygulanamayabileceği ortaya çıkarılabilir.

Bölüm 4.2 ve alt başlıklarında deprem kayıtlarının alet düzeltmesi, filtreleme işlemleri, analize tabi tutulacak dalga formlarının seçimi ve radyal-tanjansiyel dönüşümleri irdelendi. Bir sonraki bölümde Fourier analizleri sonucu frekans ortamında yapılan çözümlerinin spektral şekiller üzerinde yumuşatma fonksiyonları irdelenip karşılaştırılacaktır.

### 4.3. Deprem Sinyallerinin Frekans Ortamı Veri İşlemi

Tepki spektrum çözümlerinde sabit %5 kritik sönüm parametresi HVSR spektral eğrilerinin düzenli yumuşatılmasına olanak sağlamaktaydı. Yumuşatma işleci, özellikle derin basen etkilerinden kaynaklı yüksek baskın periyodların daha doğru belirlenmesini sağlarken gürültüden de kaynaklanabilen bu periyotlar doğru filtre ve yumuşatma süreciyle ortaya çıkarılabilir. Fourier dönüşümü kullanılır iken frekans ortamında spektral eğriyi yumuşatmak için çeşitli fonksiyonlar skaler birebir çarpılması veya filtrelenmesi şeklinde yumuşatma uygulanabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında sismoloji literatüründe sıkça kullanılan iki çeşit yumuşatma uygulanmıştır. Bunlar; Konno-Ohmachi (Konno, K., 1998) penceresi ve kayan ortalama ile yumuşatmadır. Konno-Ohmachi (fhvko) özellikle alçak frekans yer hareketi verilerinin yumuşatılmasında etkin bir fonksiyondur (Eşitlik 4.6).

$$\frac{\sin(\log_{10}(\frac{f}{f_c})^b)}{\log_{10}(\frac{f}{f_c})^b} \quad (4.6)$$

Burada; f: frekans,  $f_c$ : merkez frekansı, b: bant genişliği katsayısıdır. Merkez frekansı, deprem sinyaline ait hesaplanmış her bir Fourier frekansının normalize değerlerine karşılık gelip çok küçük değerler ile spektrum üzerinde kaydırılarak yumuşatılması sağlanmıştır. Alçak ve yüksek frekanslarda sabit bant genişliğini koruyan bu yumuşatma işlevi gören pencereye ait yuvarlatma sabiti (b) 0-100 arasında değişen değerler ile kontrol edilir. Sıfıra yakın değerler oldukça keskin bir yuvarlatmaya, 100'e yakın değerler ise spektrumun daha az yumuşatılmasına karşılık gelir. Bu çalışmada daha önceki çalışmalarda da tecrübe edinilen b katsayısının artması alçak frekanslarda daha az kayıp oluşturmaktadır ve bu yüzden b=30 değeri kullanılmıştır.

Kayan ortalama (fhvmm) n-boyutlu bir deprem spektrumunun her bir örnekleme aralığı için merkezlenmiş kayan ortalama hesaplanarak (Eşitlik 4.7) spektrumun trendi kestirilmiş olur.

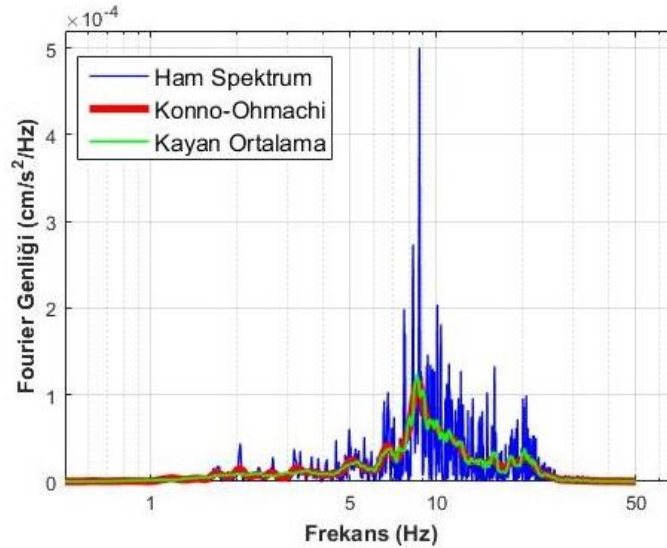
$$x(f) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} w_n \times x_{f-n} \quad (4.7)$$

Burada,  $x(t)$  yumuşatılacak deprem spektrumu,  $N$  verinin uzunluğu,  $w$ ,  $n$  ağırlık faktörüdür.  $w$  ağırlık faktörü de eşitlik 4.8'deki binom açılımı şeklinde hesaplanır;

$$w_n = \binom{N}{\frac{N}{2} + n} \times 2^{-N} \quad (4.8)$$

Çalışmada, ağırlıklar pencere boyutu ile temsil edilmiş ve spektrum verisinin başlangıcından sonuna kadar her bir merkezi eleman için toplam değerler hesaplanmıştır. pencere boyutu bir sonraki eleman için kaydırılarak elde edilen toplam kümülatif ortalamalar eleman uzunluklarına bölünerek yumuşatılmış spektrumlar elde edilmiştir. Burada önemli olan pencere boyutunun fazla girilip yumuşatmanın abartılmaması dolayısıyla spektrum eğilimine ait genliklerde veri kaybı yaşanmamasıdır.

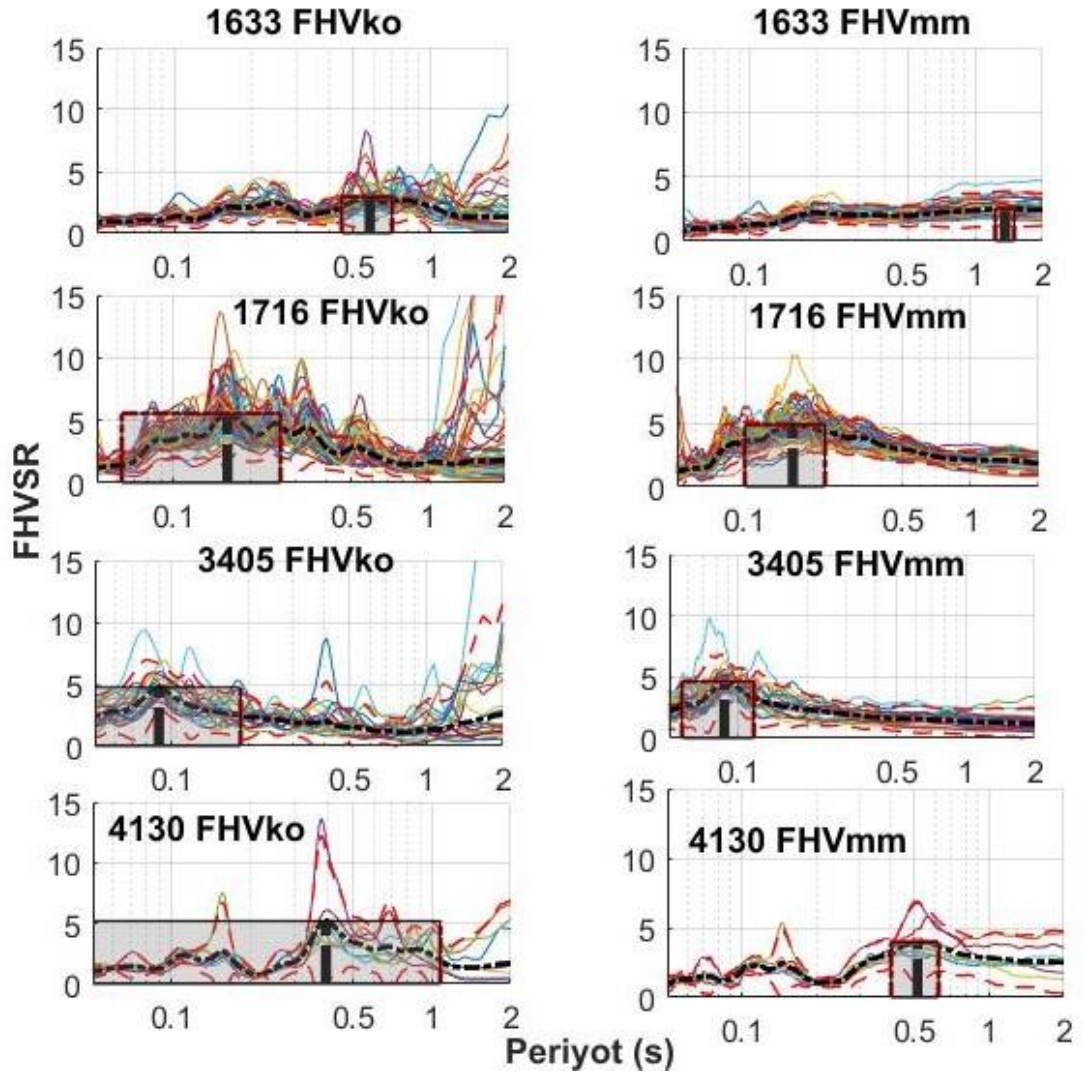
3116 kodlu istasyonda kaydedilen 4 Mw büyüklüğündeki bir depreme ait Fourier spektrumu üzerinde kayan ortalama ve Konno-Ohmachi yumuşatma sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Kayan ortalama ve Konno-Ohmachi yumuşatmalarının karşılaştırılması

Karşılaştırmada görüldüğü üzere Konno-Ohmahci düşük frekanslarda çözünürlülüğü daha etkin yakalayabilirken orta ve yüksek frekanslarda uyum oldukça yüksektir. Bu durumun incelemiş olunan yakın alan depremlerde spektral oranlar üzerinde bir etki oluşturup oluşturmadığı şekil 4.13'de resmedilmektedir.

Zemin baskın periyotları her iki durumda da yakalanabilirken standart sapmaları fhvko'ların daha yüksektir. Özellikle yüksek periyotlu ( $T_0 > 1$  s) büyütme genliklerinde fhvko'larda standart sapmaların oldukça yüksek olarak belirlendiği görülmektedir. Mikrotremorlerde düşük frekans ve genliklerin göreceli baskınlığı periyot standart sapmaları daha dar bir aralıkta tutarken depremlerde bu aralık arttığı görülmektedir. Genliklerde de aynı durum söz konusudur. 300 istasyonda kaydedilen yaklaşık 16 bin deprem verisi için gerçekleştirilen bu karşılaştırmada bu durum gözlenmiştir. Bu yüzden tepki spektrumları ile karşılaştırılmaya gidilirken kayan ortalama yumuşatması tercih edilmiştir. Bölüm 4 kapsamında özetle, deprem verilerinin elde edilmesi, eleme kriterleri ve verilerin işlenmesi incelendi. Burada dikkat edilmesi gereken husus eleme kriterlerinin, sinyal-gürültü oranlarının, zaman-frekans ortam analizlerinin ve faz okumalarının eşdeğer ve titizlik içeren bir süreç gerektirdiğidir. Her ne kadar yazılan kodlarla süreç hızlandırılmaya çalışılsa da kullanıcı tarafından belirlenen dS kısımları uzun zaman almıştır. Zemin sınıflaması için oluşturulacak zemin baskın periyot (spektral periyot, rezonans periyodu, temel periyot) aralıklarının ve elde edilecek spektral şekillerin güvenilirliği, bu sürecin titizlikle yerine getirilmesiyle sağlanması düşünülmüştür. Bir sonraki bölümde oluşturulan veri seti ve onun işlenmesi sonucu elde edilecek spektral şekiller üzerinden analizler kapsamlı bir şekilde irdelenecektir.



Şekil 4.13. Yumuşatmaların (fhvko:konno-ohmahci, fhvmm:kayan ortalama) spektral oranlardaki etkileri ve karşılaştırılmaları. Koyu siyah eğriler, istasyonda kaydedilen depremlere ait Fourier spektral oran (fhvsr) eğrilerinin (renkli) ortalamalarını temsil etmektedir. Kırmızı çizgili dikdörtgen kutular zemin baskın periyotlarındaki standart sapmaları temsil ederken kırmızı kesikli çizgilerde genliklerdeki güven aralığını göstermektedir.

## 5. SPEKTRAL ŞEKİLLER

Deprem kayıtlarını oluşturan üç bileşen ivme kayıtlarının işlenmesi ve analize hazır hale getirilmesi sonucu her bir bileşen için tepki spektrumları ve Fourier spektrum oranlarının hesaplanarak oluşturulduğu spektral şekiller bu bölümde irdelenip analiz edilmiştir. Bilindiği gibi, oluşan bir yer sarsıntısı nedeniyle elastik sistemlerin güç gereksinimi ortaya koymak için kullanılan ivme tepki spektrumu yapıya zarar verebilecek potansiyeli belirlemede şu ana kadar kabul görmüş en yaygın araçtır.

Bu bölümde, tepki ve Fourier spektrum oranları karşılaştırılacak, konvansiyonel zemin sınıflamada kabul gören  $V_{s30}$ 'lar ile ilişkileri araştırılacak, bölgeler ve jeolojik formasyon bazlı için spektral şekiller hesaplanıp derlenecek, tüm istasyon ağı için ortalama spektral şekiller elde edilip hesaplanan sonuçlar ile periyot bazlı bir zemin sınıflama akış şeması oluşturulacaktır.

Zemin etkisini belirlemede sayısal veya analitik çözümlerin gerçek yer hareketi verileriyle uyuşmaması şu üç hususa bağlanabilir;

1-kestirilen yer kesit bilgileri (kesme modül indirgeme, sönümlenme oran eğrileri gibi),

2-yapıcı modellerin kısıtlamaları (elastik olmayan gerilmelerin hesaba katılmaması),

3-dalga yayılım kabulleri ki sıklığın azalması dalgaların kırılarak düşey yönde ilerlemesini sağlar. (genelde düşeyde yayılıp yatay yönde polarize olan SH dalgası kabul edilir).

Bunun için bu tez kapsamında 10 binlerce deprem kaydının analizi ile yani deneysel (aletsel) verilerin çokluğu sayesinde elde edilen sonuçlar güvenilirdir. Yerel zemin koşulları, dinamik bir yük altında yapı ve zemin baskın periyotları birbirlerine yakın değerler üretirlerse binalara hasar verebilecek düzeyde genellikle farklı dalga periyot

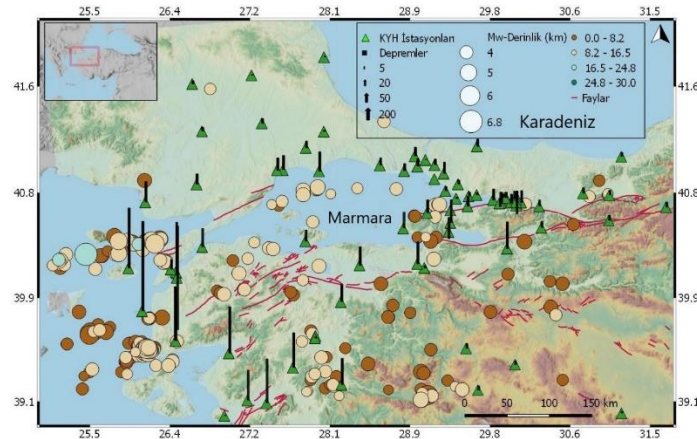
aralıklarında zemin büyütme ve küçültme (deamplifikasyon) gösterirler. Yerel zemin koşulları ile deprem hasarları arasında kuvvetli ilişkiyi göz önüne alarak deprem yönetmeliklerinin farklı kategorilerde zeminleri sınıflandırması mühim bir öneme sahiptir. En çok kullanılan zemin sınıflama parametresi, 30 metre zemin derinliğindeki ortalama kesme dalga hızı ( $V_{s30}$ ) birçok deprem yönetmeliğinde etkin olarak kullanılmaktadır (NEHRP (Building Seismic Safety Council (BSSC), 2003), Eurocode 8 (European Committee for Standardization (CEN), 2004, TBDY, 2007). Bununla beraber zemin sınıflamasının yer hareketi kestirim eşitliklerinin (GMPE) belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Geleneksel kesme dalga hızı yapı esasına dayanan sınıflamalar GMPE'lerin hesaplanmasındaki doğruluğu kaya veya zemin kıstasına göre daha doğru kestirdiği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu doğruluğun periyot bazlı sınıflamalarla artırılacağı Zhao ve diğ. (2006), Fukushima ve diğ. (2007) ve Alessandro (2012) tarafından irdelenmiştir. Örneğin Alessandro (2012) çalışmasında GMPE'ler ile hesaplanan zemin etki katsayılarına ait hata oranlarını azaldığını ortaya koymuşlardır. Önerdiği sınıflama ile konvansiyonel sınıflama kullanılarak hesaplanan GMPE'lerin standart sapmalarda dikkate değer bir fark oluşturmadığı anlaşılmış fakat yer hareketi kestirimindeki belirsizlikleri azalttığı gösterilmiştir.

### **5.1. Tepki Ve Fourier Spektral Oranlarının Karşılaştırılması**

Spektral şekiller terimi tepki ve Fourier spektrum oranları sonucu hesaplanarak çizdirilen depremlerin karakteristik transfer fonksiyon (yatay ve düşey spektrum oranları, hvsr) eğrileri için kullanılmaktadır. Tepki spektrumu, deprem mühendisliği ve sismik tasarımla ilişkili uyarı tepkisini en uygun şekilde temsil eden bir matematiksel araçtır. Deprem yer hareketine ilişkin frekansların açığa çıkarılmasında Fourier genlik ve tepki spektrumları sismologlar ve deprem mühendislerince sıklıkla kullanılmaktadır. Hareket denkleminin sayısal çözümü ile elde edilen spektral periyotlara karşılık gelen en yüksek tepkisel yer değiştirmelerin ifadesi tepki spektrumu ile zaman serilerinden müteşekkil dalga formunun sinüs ve kosinüslerine ayrıştırılıp frekanslarını ortaya çıkarmak için kullanılan Fourier dönüşümü esasında aynı amaca hizmet etmektedir. Tepki spektrumu, sismik girdiyi kullanarak süreksiz

yer hareketini tanımlar ve genellikle yatay bileşenlere ait spektral ivmeleri hesaplarken, Fourier dönüşümü ile yer hareketi zaman serisi çözülerek direkt frekans içeriğine ayrılabilir. Sismologlar Fourier spektrumlarını tercih ederken deprem mühendisleri de tepki spektrumlarını tercih etmektedir. Doğrudan olmasa da bazı araştırmacılar (Zola, 2001; Datta, 2010; Bora ve diğ., 2016) bu iki yaklaşımın karşılaştırılmasına dair analizler gerçekleştirmişlerdir. Zola (2001), sismik girdi verisi olarak kullanılan süreksiz hareketlerin tanımlanmasında tepki spektrumlarının kullanıldığı belirtirken, Datta (2010), yer hareketine ait frekansların doğrudan elde edilmesinde Fourier spektrumlarının daha etkin olduğunu söylemiştir. Bora ve diğ., (2016) ise çalışmasında rastsal titreşim teorisine dayanarak, yer hareketi kestirim denklemleri üzerinde Fourier ve tepki spektrum çözümlerini karşılaştırmıştır. Deprem veya titreşimlerin zeminde yayılırken ürettiği baskın frekansları ve bunlara karşılık gelen büyütme hesaplamak için bu çalışma kapsamında iki yaklaşım karşılaştırılmıştır.

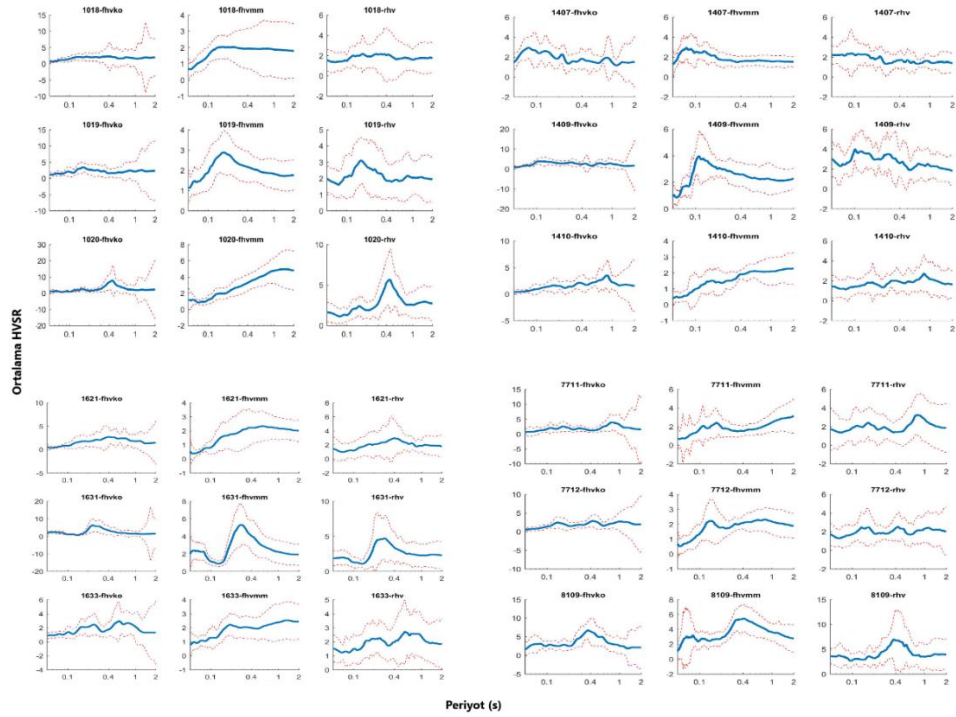
Karşılaştırmalar 330 istasyonda ve sonuçlar Ek-Tablo 2’de sergilenmiştir. Bu başlık altında Marmara bölgesi istasyonlarına odaklanılmış ve spektral şekiller hesaplanıp çizdirilerek karşılaştırılmıştır. Kaydedilen veri yoğunluğunun istasyonlara göre çizimi Şekil 5.1 de sergilenmektedir. Her bir istasyonda en az 3 deprem var ise o istasyona ait baskın periyotlar ve büyütme hesaplanmıştır.



Şekil 5.1 Analiz edilen depremlerin derinlik-büyükliklerine (renkli daireler) göre dağılımı ve istasyonların (yeşil üçgenler) kaydettiği veri sayısının ölçeklendirilmesi (siyah dikey çubuklar)



Burada Fourier hesaplamaları Konno-Ohmachi (Livaoglu H., ve Şentürk E., 2018) ve kayan ortalama fonksiyonları ile spektral ortamda yumuşatılırken tepki spektrum analizlerinde %5 kritik sönüm oranı ile yumuşatılmıştır. Şekil 5.2 'de her bir istasyon için hesaplanan spektral şekiller sergilenmektedir.



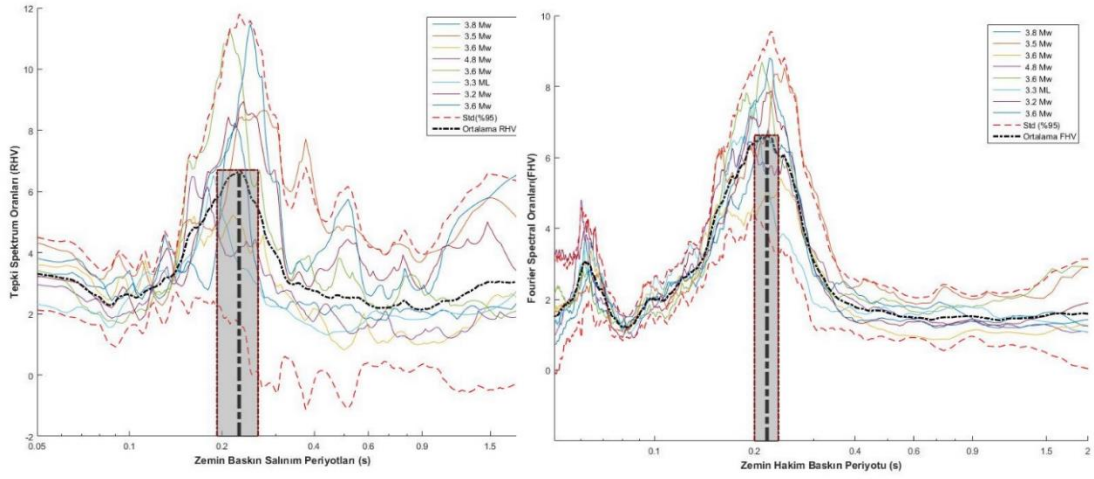
Şekil 5.2. Fourier (fhvko ve fhvmm ile yumuşatılmış) ve Tepki spektrum oranlarına ait ortalama spektral şekiller. Mavi eğriler ortalama istasyonlarda kaydedilen tüm spektral eğrilerin ortalamasını gösterirken kırmızı kesikli çizgiler ise standart sapmaları göstermektedir.

Bölüm kapsamında incelenen istasyonlar özelinde her bir yaklaşıma ait baskın periyotlar, büyütme, standart sapmalar ve istasyonlara ait bilgiler Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre derin sedimanlarda (Livaoglu ve Irmak, 2017) kesme dalga hızı ve baskın periyotlar arasında uyumsuzluklar olabileceği gözlemlenmekte olup Fourier ve tepki spektrum çıktılarında da yumuşatma fonksiyonlarına göre zemin sınıfını değiştirebilecek seviyede anomaliler gözlemlenebilmektedir (örnek Şekil 5.2-1621 kodlu istasyon). Tabloda mp ve nd sırasıyla çoklu pikler ve tanımlanamayan eğriler için kullanılmıştır (Bunlara ilişkin detaylar Bölüm 6.3'de irdelenecektir).

Tablo.5.1. İstasyonlara ait her bir analiz ve yöntem için elde edilen sonuçlar

St	vs <sub>30</sub>	prhv	pfhv	arhv	afhv	no	std_t0(rhv)	std_t0(fhv_ko)	std_t0(fhv_mm)
1004	311	0,35	0,36	3,49	2,86	3	0,15	4,23	0,01
1015	312	0,89	0,91	4,53	6,36	59	0,28	2,14	4,31
1016	430	0,60	0,59	3,30	3,77	78	0,27	2,77	4,18
1018	555	nd	nd	nd	nd	26	0,21	2,28	1,96
1019	444	0,17	0,18	3,10	2,88	104	0,35	2,94	0,35
1020	293	0,45	0,45	5,64	7,79	39	0,05	1,84	0,87
1407	273	nd	0,08	nd	2,94	12	0,04	5,76	0,03
1409	362	mp	0,11	mp	3,95	11	0,13	2,26	0,04
1410	338	0,84	nd	2,73	nd	9	0,59	0,93	5,04
1411	229	0,43	0,13	3,38	3,04	15	0,53	2,36	1,05
1602	272	0,64	nd	3,35	nd	5	0,16	-	-
1618	314	0,40	0,33	3,90	4,24	23	0,21	-	0,11
1621	396	0,39	0,60	2,89	2,34	28	0,22	-	0,15
1631	410	0,29	0,28	4,72	5,30	37	0,11	-	0,10
1633	375	0,55	nd	2,57	nd	42	0,31	-	-
1702	364	0,30	0,32	3,10	3,10	4	0,35	-	-
1711	403	0,50	nd	3,01	nd	134	0,14	-	-
1713	483	0,35	0,29	3,56	3,17	110	0,23	0,55	0,05
1714	429	0,40	0,40	2,12	2,10	116	0,39	0,89	0,19
1715	214	0,97	1,17	2,52	3,86	42	0,07	0,59	0,22
1716	366	0,17	0,17	5,46	4,85	120	0,14	0,10	0,08
1717	238	0,81	0,81	3,69	4,77	21	0,04	0,03	-
2201	315	0,36	0,27	3,30	2,91	46	0,34	0,08	0,08
2202	322	0,22	0,18	3,72	3,17	7	0,12	5,81	0,27
2204	441	0,07	0,07	4,21	4,99	8	0,08	0,09	0,02
3405	543	0,14	0,10	2,74	4,63	21	0,20	0,10	0,03
3406	436	0,30	0,30	3,33	3,33	17	0,05	0,11	0,09
3410	587	0,15	0,15	3,83	4,09	20	0,05	1,21	0,06
3411	323	0,22	0,14	4,38	4,15	25	0,06	3,30	0,06
3412	247	1,00	1,07	2,49	3,46	25	0,30	0,12	4,06
3413	452	0,21	0,19	2,46	2,43	20	0,17	1,91	0,09
3416	420	mp	mp	mp	mp	16	-	-	-
3418	1182	mp	0,10	mp	2,78	10	-	0,20	0,08
3901	500	0,27	nd	3,00	nd	2	0,43	-	-
3902	317	0,54	0,56	5,83	5,43	11	0,46	0,28	-
3903	515	nd	nd	nd	nd	2	-	-	-
4114	344	0,26	0,22	5,58	5,97	11	0,06	0,06	0,04
4115	253	nd	0,16	nd	2,60	10	-	-	0,17
4116	181	0,52	0,54	4,72	4,52	12	0,13	0,10	0,31
4117	282	nd	0,22	nd	2,75	13	-	-	0,10
4118	190	nd	0,22	nd	3,10	19	-	-	0,06
4120	214	0,81	nd	4,27	nd	10	0,23	-	-
4121	286	0,66	0,71	3,15	2,63	14	0,31	8,28	0,08
4122	303	0,35	0,32	3,30	2,63	10	0,24	2,02	0,07
4123	279	0,40	0,40	2,89	2,61	8	0,14	-	0,05
4126	188	0,69	0,63	4,39	4,94	14	0,15	0,21	0,93
4127	215	mp	0,20	mp	1,61	6	-	-	0,10
4128	258	mp	0,16	mp	3,12	7	-	-	0,07
4130	484	0,41	0,51	3,93	3,96	7	0,16	0,68	0,11
7706	277	0,75	0,23	4,10	5,14	47	0,10	0,13	0,13
7707	312	nd	nd	nd	nd	35	-	-	-
7709	382	0,23	0,22	2,35	2,33	28	0,20	3,78	0,06
7711	199	0,80	nd	3,23	nd	32	0,33	-	-
7712	280	mp	nd	mp	nd	22	-	-	-
8109	183	0,45	0,42	6,88	5,44	15	0,08	0,10	0,13
8110	407	0,23	0,20	6,35	8,03	14	0,03	0,35	0,09
5403	215	0,70	0,68	2,44	3,15	19	0,24	0,12	2,76
5404	381	nd	0,12	nd	2,59	14	-	3,98	0,08
5405	401	0,26	0,27	3,44	2,77	13	0,22	0,10	0,05

Tablo 5.1’de Fourier ve tepki spektrum yaklaşımıyla hesaplanan zemin baskın periyotları (prhv, pfhv) ve onlara karşılık gelen büyütme (arhv, afhv) gösterirken std sütunları her bir yönteme ve yumuşatma fonksiyonlarına ait zemin baskın periyotlarındaki standart sapmaları göstermektedir. Jeolojik formasyon ve kesme dalgaları hızları perspektifinden bakıldığında, ayrışmamış Kuvarterner birimler üzerinde kurulu Düzce-8110 kodlu istasyonda örnek teşkil etmesi açısından  $V_{s30}=407$  m/sn kesme dalga hızına sahip, hem periyot standart sapmalarında hem de büyütme (HVSr) standart sapmaları az iken ( 0.1 ve +2 ) baskın periyot 0.23 sn’lerde olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.3).

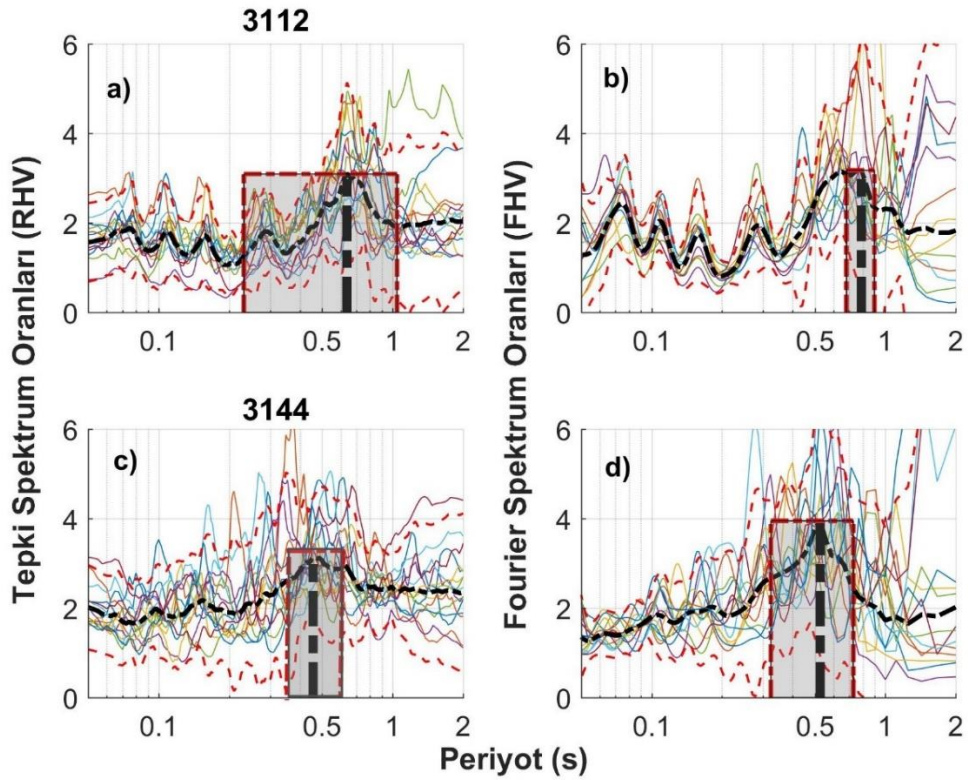


Şekil 5.3. 8110 kodlu istasyona ait Fourier spektral oranları. Siyah kalın çizgi ortalama spektrumunu kırmızı kesikli çizgiler ise +1 standart sapmalara ait, %95 güvenlik sınırlarını temsil etmektedir. Kesikli kalın çizgi zemin baskın periyotlarına işaret ederken gölgeli kısımlarda baskın periyotların standart sapma aralıklarını temsil etmektedir.

Fakat görüldüğü gibi Fourier spektrumunda alçak frekanslarda da baskın bir pik görülmektedir. Bu tip etkilerde tepki spektrum oranlarının daha güvenilir sonuçlar ürettiği söylenebilir (Livaoğlu H., ve diğ., 2021).

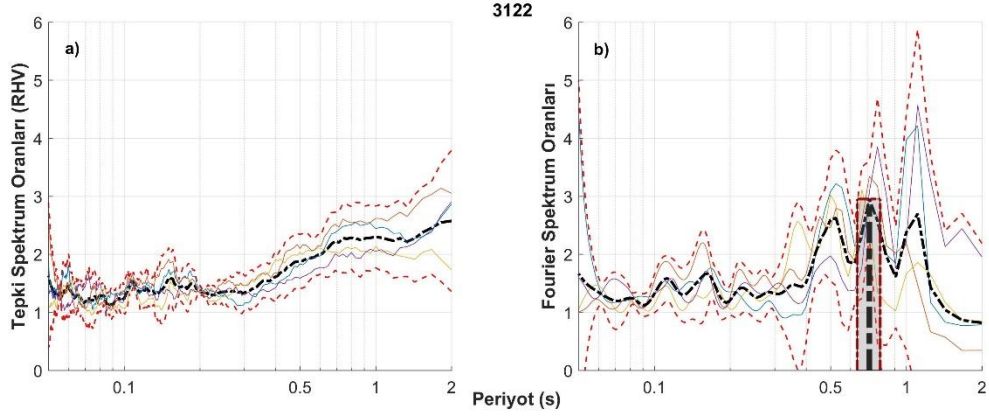
Yüzlerce istasyonda gerçekleştirilen bu karşılaştırmalara ait temsili örnekler Şekil 5.4 ve 5.5 de sunularak açıklanmıştır. İstasyonlara ait jeolojik formasyon bilgisi ve  $V_{s30}$  bilgileri dahilinde Şekil 5.4’de karşılaştırılmalar yapılmıştır. Hemen hemen kuvvetli spektral şekil uyumun sergilendiği bu karşılaştırma örneklerinde, Kuvarterner yaşlı

alüvyonal zeminde kurulu düşük  $V_{s30}$ 'a sahip 3112 kodlu istasyonda RHV'de 3,09 ( $\pm 1.2$ ) spektral büyütme ve 0.64 sn ( $\pm 0.35$ ) baskın periyot hesap edilmişken, FHV'de spektral büyütme 3.17 ( $\pm 2.1$ ) baskın periyot ise 0.75 ( $\pm 0.15$ ) saniyedir. Bu durum her iki yaklaşımda  $V_{s30}$  ve jeolojik formasyon bilgisi ile uyumlu olmasına rağmen RHV spektral şekillerinde gözlenen baskın salınım periyotlarına ait standart sapma nispeten daha fazla iken FHV'de düşük görülmektedir. Büyütmeler ait standart sapmalar ise FHV eğrisinde daha yüksek olduğu görülmektedir. (Şekil 5.4a ve b).



Şekil 5.4. 3112 ve 3144 kodlu istasyonlara ait FHV ve RHV'lerin karşılaştırılması

Bazalt ve 485 m/sn  $V_{s30}$  hızına sahip bir zeminde kurulu 3144 kodlu istasyonda baskın periyotlar ve spektral büyütme benzer iken Kuvarterner yaşlı derin kaynaklı tabaka etkisi yüksek periyotlarda baskın salınımlara yol açmıştır. Mühendislik ana kaya sayılabilecek Miyosen yaşlı ayrık karbonat litoloji üzerinde kurulu ve 1011 m/sn  $V_{s30}$  hızına sahip 3122 kodlu istasyon karşılaştırılması Şekil 5.5'de sergilenmektedir.



Şekil 5.5. Anakaya üzerinde kurulu 3122 kodlu istasyona ait FHV ve RHV'lerin karşılaştırılması

Deprem ve Mikrotremör sinyal çözümlenmelerine ait teorik ve çoğu gözlemsel çalışmalarda anakaya üzerinde hesaplanan spektral oranların düz bir eğri tepkisi verdiği belirtilmektedir. Teorik çalışmalarda çok sığ bir tabakanın varlığı düşük periyotlarda yüksek spektral büyütme üretse de yüksek periyotlarda bu durum gerçekleşmez. Şekil 5.5a'da beklenildiği gibi RHV'de düz bir tepki eğrisi hesaplanmış fakat FHV'de yüksek periyotlarda yüksek spektral büyütme baskın olduğu görülmektedir ki bu da anakayada beklenilmeyecek bir durumdur. FHV'de gözlemlenen bu durum, mostra vermiş anakaya altında çok sığ bir gevşek tabakanın (0-3 m) varlığına işaret edebilir fakat derinden gelen asli zemin hakim periyot etkisini baskılayıp yanıtıcı spektral periyotlar üretmeye yol açmaktadır.

Tepki ve Fourier spektral oranlarının birbirleriyle olan ilişkileri ve karşılaştırmalarından elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

Alçak salınım periyotlarındaki yüksek sinyal frekansları tepki spektrumundan elde edilen spektral şekilleri bozmazken, yüksek salınım periyotları düşük sinyal frekanslarında spektral enerjiyle kontrol edilir ki bu da Fourier ve tepki spektrumlarının ilişkili olduğunu göstermektedir.

Bir üst başlıkta da belirtildiği gibi, Fourier spektrumlarının yumuşatılmasında kayan ortalamanın Konno-Ohmachi filtresine göre genliklerde ve baskın periyotlarda daha az standart sapmalar ürettiği saptanmıştır. Zemin tabakalarına ait düşük hızlı  $V_{s30}$

süreksizliklerinde ve anakayaya denk düşen sahalarda tepki spektral oranlarının mühendislik amaçlı kullanımlarda Fourier spektral oranlarına göre daha güvenilir sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Bunun ana nedenlerinden biri de ham Fourier spektrumlarına uygulanan yumuşatma fonksiyonlarının göreceliliğidir. Bu durum tepki spektrum oranlarında yönetmeliklerce de kabul gören %5 kritik sönüm ile daha kararlı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

400 istasyonda kayıt edilen 29.842 deprem ve bunlardan analiz edilen 8948 üç bileşen sinyal kaydının tepki ve Fourier spektrumları hesaplanarak karşılaştırılmaları yapıldı. Dört yüz kuvvetli yer hareketi istasyonu kullanılarak karşılaştırma sonuçları üretilen çalışma kapsamında periyod bazlı sınıflamada her ne kadar tercih tepki spektrumlarından yana da olsa,  $V_{S30}$  ve anakaya derinlik bilgisi olmayan zeminlerde veya istasyonlarda iki yaklaşımın da beraber çözümlenip karşılaştırılması daha güvenilir ve doğru sonuçlar için önerilendir.

## **5.2.Farklı Deprem Ve İstasyonların Spektral Şekiller Üzerindeki Etkileri**

Spektral şekillerin üretilmesinde kaynak olan deprem dalga sinyallerinin uzak alan depremler için ( $R>150$  km) tepki spektrum oranlarına olumsuz bir etkileri olmadığını gösteren çalışmalardan (Yamazaki ve Ansary, 1997 ; Zhao ve diğ., 2006) yola çıkılarak uzak ve aynı zamanda akın alan depremler için bu bölümde kapsamında incelenmiştir.

### **5.2.1. Farklı Depremlerin Aynı İstasyonlardaki Tepki Spektrum Çözümleri**

Uzaklığın etkilerini incelemek için deneysel analizler farklı zemin özellikleri gösteren beş farklı istasyonda toplam üç yüz deprem için yapılmıştır (3519, 4114, 4130, 920, 4817). Uzaklığın spektrum oranlarına etkileri birçok istasyonda incelenerek verilerin elenmesinde bir ölçüt sağlamada etkili olmuştur.

TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZF 3519 istasyonun ait çözümlemeye (Şekil 5.6a) çok yakın alan depremlerin bozucu etkisi görülmekle birlikte uzak alan bir depremin de spektral eğilimlere ait biçimleri bozmadığı bunun da depremin büyük ve sığ olmasından kaynaklı olduğu belirtilebilir. ZD'ye ait 4114 istasyonunda (Şekil 5.6b)

spektral eğilimi göreceli uzak alan depremlerin bozduğu gözlemlenmektedir. ZC'ye ait 4130 nolu istasyonda (Şekil 5.6c) ortalama spektral biçimleri bozan bir eğilim gözlemlenememekle birlikte 5 Mw büyüklüğünde 282 km uzaklıktaki bir depremin yüksek periyotlarda da baskın büyütmelemlere oluşturduğu saptanmıştır. TDBY 2018'de ZA ile tanımlanan zemin sınıfında  $V_{S30}$ 'ların 1500 m/sn'den büyük olma koşulu diğer yönetmeliklerde mühendislik anakaya hız kıstaslarını (<760 veya 800 m/sn) da aşan bir önerme nedeniyle bu hususa uyan iki istasyon incelenmiştir (Şekil 5.6e ve Şekil 5.6f).

3536 kodlu istasyon tipik baskın periyot özellikleri göstermeyen tanımsız/düz spektral şekillere sahip iken 4817 kodlu istasyonda 0,12 sn'lerde yoğunlaşmış baskın pikler görülebilmektedir. 4817 (Şekil 5.5f)'de ortalama spektral eğilim biçimini yakalayan fakat küçük büyütmelemler gösteren 212 km uzaklıkta ve nispeten düşük bir yer ivmesi (1.19 Gal) ile 6,2 Mw büyüklüğe sahip bir olaydır.

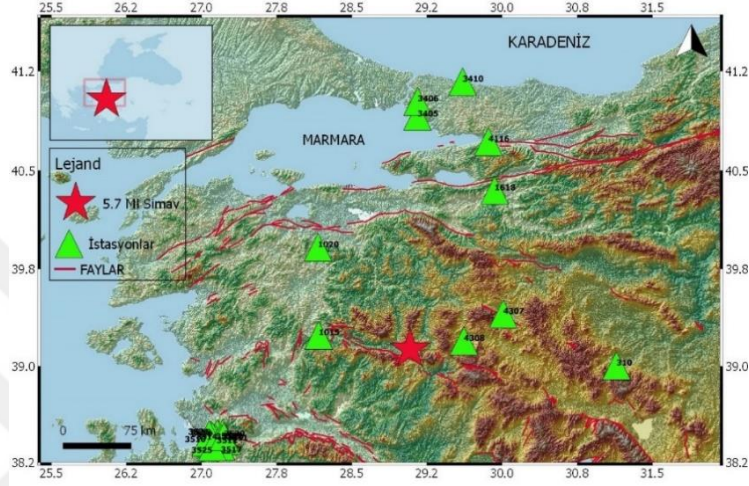
Yakın alan (30 km) 3,6 Mw'lik bir depremde 0.08 s' de yüksek büyütmelemlere ait bir deprem de ortalama spektral trende uymadığı görünmektedir. Burada anlaşılmaktadır ki, 150 km den büyük ve 30 km'den küçük uzaklıklarda spektral eğilimlere ait biçimleri bozucu bir etki açıkça gözlemlenebilmektedir. Sismoloji ve deprem mühendisliği literatüründe yakın ve uzak alan tanımlamaları çalışma amaçlarına göre değişse de bu bölümde yapılan incelemeler sonucu 30-150 km aralığındaki olaylarda spektral biçimlerin korunduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak uzak alan depremlerde saptanan bozucu etki yakın alan kayıtlarında da gözlemlenmemiştir.





### 5.2.2. Aynı Depremın Farklı İstasyonlardaki Tepki Spektrum Çözümleri

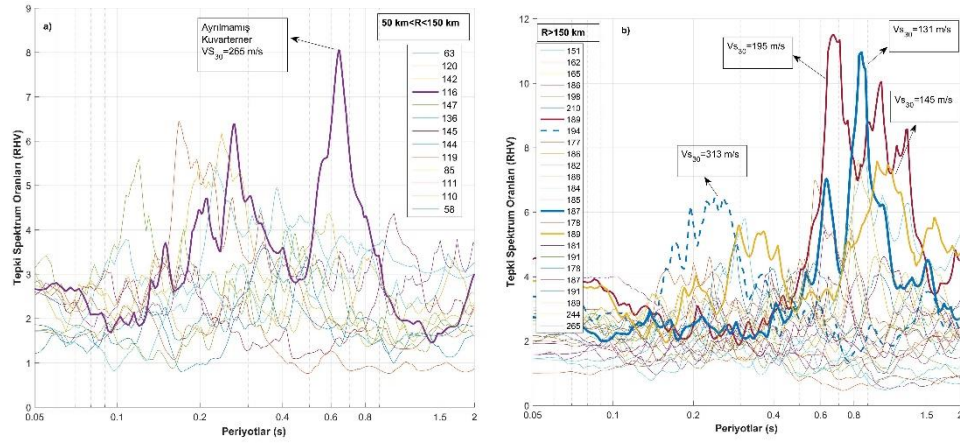
19.05.2011, 23.15 tarih ve saatinde Kütahya'nın Simav ilçesinde meydana gelen 5,7 Ml büyüklüğünde ve 24 km derinlikli deprem, Şekil 5.7'de gösterilen haritalardaki istasyon kayıtları analiz edilerek tepki spektrum oranlarında oluşabilecek spektral şekil biçimleri ve eğilimleri incelenmiştir.



Şekil 5.7. Kırmızı yıldız depremin merkez üssünü gösterirken yeşil üçgenler de depremi kayıtlarının analiz edildiği istasyonları göstermektedir.

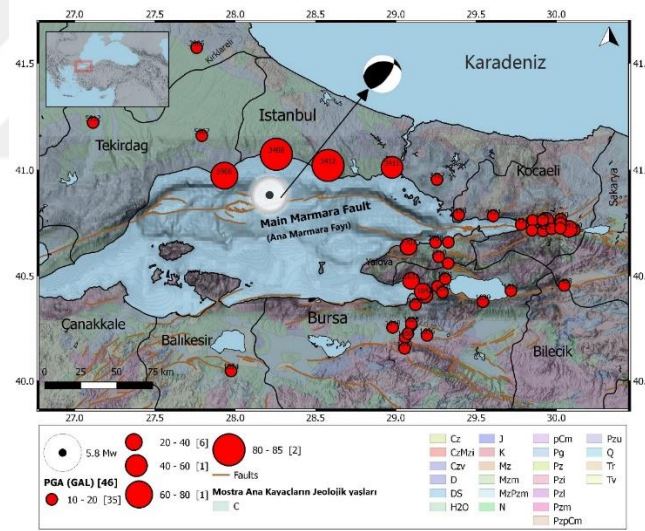
Kesme dalga hızlarının nispeten düşük olduğu uzak alan istasyonlarda RHV'ler farklı özellikler sergilerken baskın periyotları da yüksek spektral büyüklüklerde büyük salınımlara karşılık gelmektedir (Şekil 5.8b). Doğası gereği aynı depremin farklı zemin özelliklerinde kurulu istasyonlarda sergilediği karakteristik davranışlar özellikle yakın alan istasyonlarda belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 5.8a).

Buradan yola çıkarak, zemin sınıfı belirlemede, tüm istasyon verileri değerlendirilerek oluşturulacak ortalama spektral şekiller ve baskın periyot aralıkları için yüksek kalitede ve bollukta aletsel verilerin analizi sonucunda doğru ve güvenilir kazanımlar elde edileceğine işaretir. 26 Eylül 2019 13.59'da Silivri açıklarında (Marmara Denizi) meydana gelen 5,8 büyüklüğündeki depremin bölgeyi çevreleyen kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilmiş ivmelerin tepki spektrum analizleri gerçekleştirildi. En yüksek yer ivmesi 10 Gal ve üzerinde kaydeden 46 alıcı istasyonu incelendi.



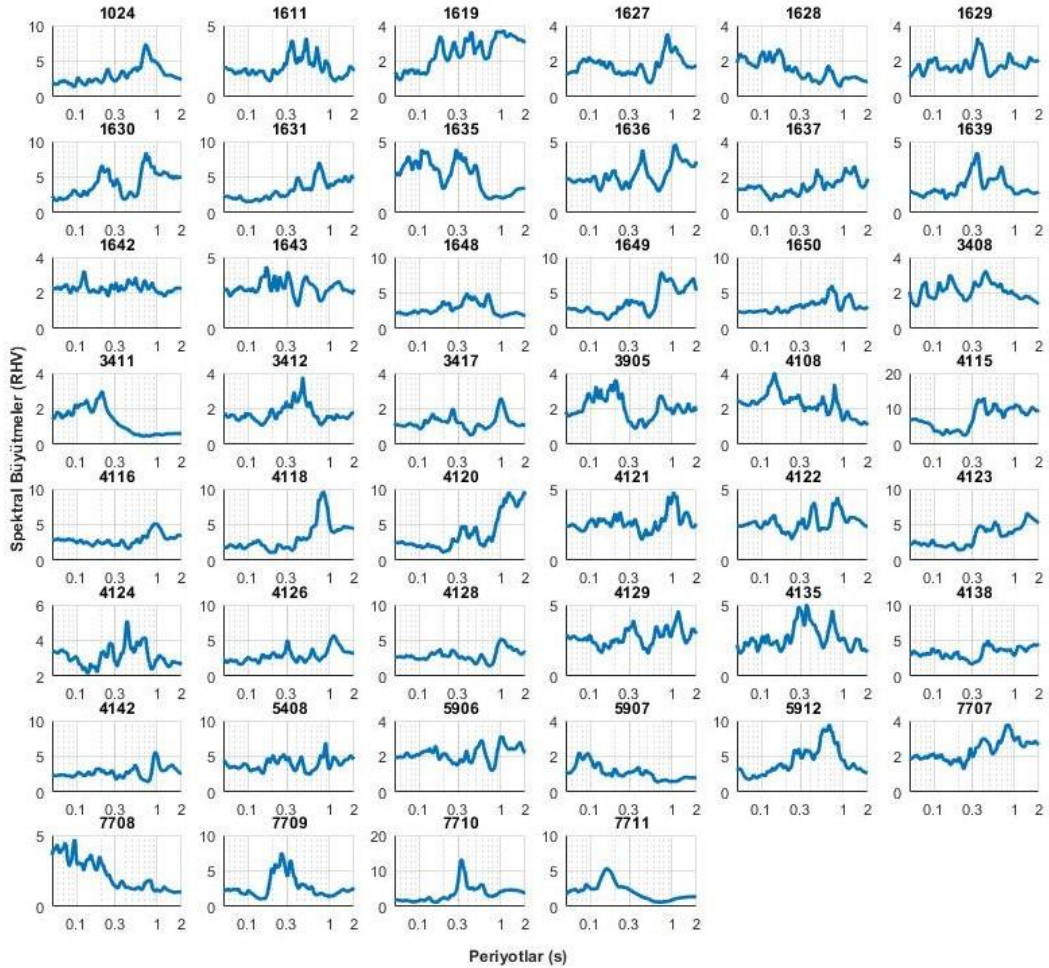
Şekil 5.8. Aynı depreme ait yakın ve uzak alan spektral şekillerin karşılaştırılması.

En yüksek yer ivmesi 3412 kodlu deprem merkez üstüne 34 km uzaklıktaki Büyükçekmece ilçesinde kurulu istasyonda 84,9 Gal olarak kaydedildi. Şekil 5.9'de deprem merkez üssü ve kaydedilen ivmeler boyutlarına göre gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Deprem merkez üssü ve istasyonlarda kaydedilen en yüksek yer ivmesi büyüklükleri haritası. Kırmızı noktalar istasyonlarda kaydedilen ivmelerin büyüklüklerine göre olan boyutlarını göstermektedir. Depremin odak mekanizması çözümü de AFAD ilksel raporuna göre doğrultu atım bileşenine sahip ters faylanmaya işaret etmektedir. Haritadaki altlık ise topoğrafya ve renkler de temel jeolojik formasyonları göstermektedir.

Hesaplanan tepki spektrum oranları baskın zemin periyotlarının ve büyütmelerin geniş bir bant aralığında sergilendiği Şekil 5.10'de gösterilmektedir. 247 m/sn  $V_{S30}$ 'a sahip 3412 kodlu istasyon depreme ait en yüksek yer ivmesini (84,9 Gal) kaydederken, 638 m/sn  $V_{S30}$ 'a sahip 3408 kodlu istasyon ikinci en büyük yer ivmesini (81,6 Gal) kaydetmiştir. Bu durum, deprem yönetmeliklerde ye alan Borchardt (1994), Boore ve Joyner (1997) tarafından ileri sürülen  $V_{S30}$  bazlı sismik zemin sınıflamasının ve Boore (2004) tarafından NEHRP (Amerikan Ulusal Deprem Tehlikesini Azaltma Programı) için uygun görülen zemin büyütmelerinin,  $V_{S30}$ 'lara göre belirlenen zemin sınıflarının öngörülen zemin etkisini doğrusal veya doğrusal olmayan koşullarda yansıtamadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.10. 46 istasyona ait tepki spektrum sonuçları

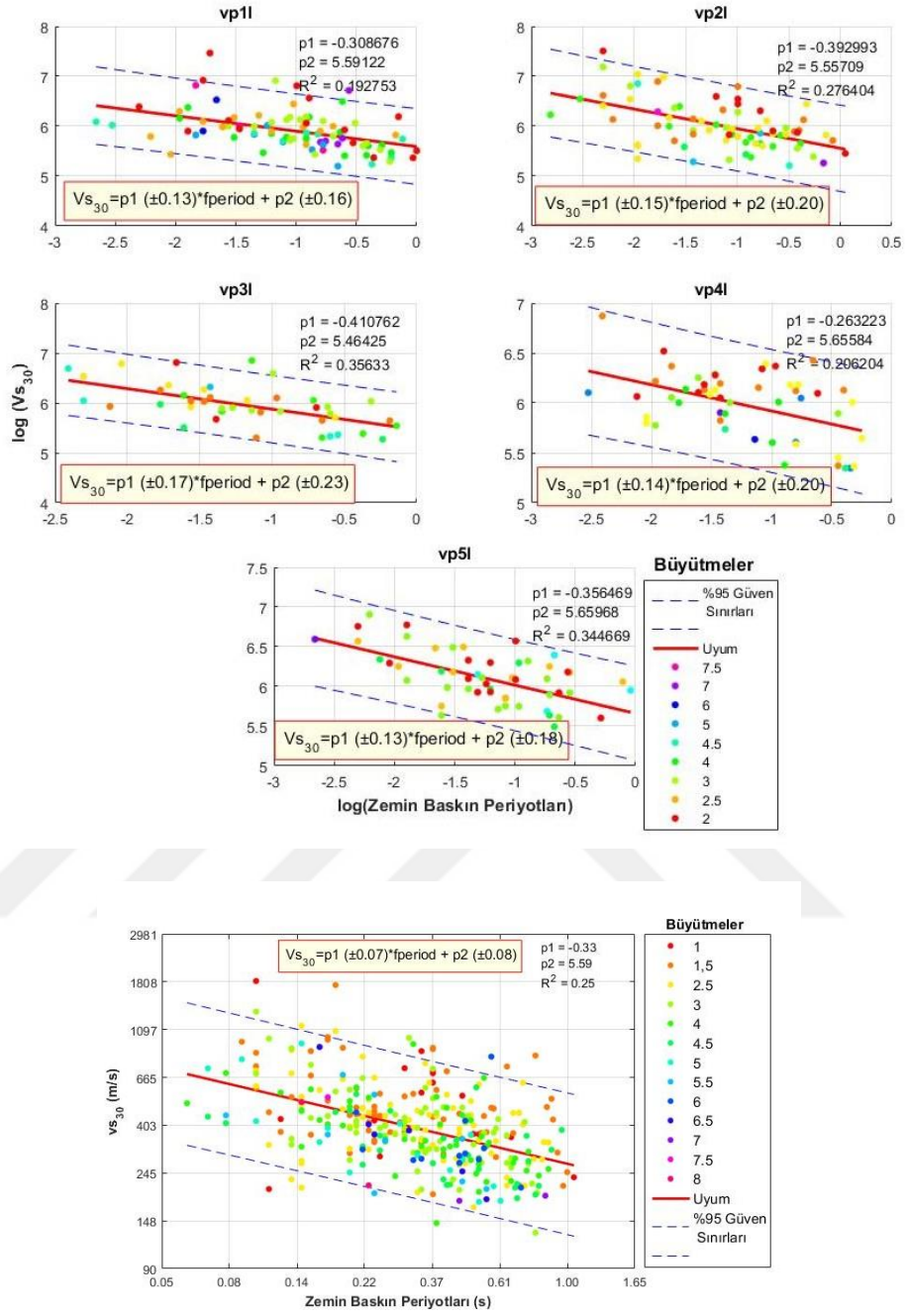
### 5.3. Spektral Şekillere Ait Çıktıların $V_{S30}$ 'lar İle İlişkisi

Günümüzde, çoğu çalışmada ve mühendislik tasarım uygulamalarında, zemin tepkisi ve özellikleri, en temel usul olan kesme dalgasının ortalama 30 m derinlikteki hızları ile tanımlanmaktadır. Fakat bu genel ve kabul gören kanıya ilişkin karşıt çalışmalar da mevcuttur. Lee ve diğ., (1995) hız tipi sismik zemin sınıflama değerlerinin belirleyici ölçüt olmadığını ileri sürmektedir. Çalışmalarında, belirtilen ortalama kesme dalga hız değerlerinin daha derin sediman kalınlıklı uygulamalarda geçerliliklerinin ortaya konulmadığı sonucuna varmışlardır. Novikova ve Trifunac (1995)'de 30m ortalama kesme dalgası hız değerlerinin düşük zemin frekanslarında belirleyici olmadığını ve yalnız yüksek frekanslarda uygulanabilir olduğunu öne sürmektedir. Castellaro ve diğ., (2008)'de ise  $V_{S30}$ 'ların sismik zemin büyütme hesaplamaları için zayıf bir temsiliyet gösterdiğini ileri sürmektedir.

Yapılan bazı uluslararası çalışmalarda (Bard, 2019; Ghofrani ve Atkinson, 2014)  $V_{S30}$ 'ların mühendislik anakayasını belirlemede spektral azalım değerleri ile ilişkisi ve özellikle spektral şekillerden elde edilen baskın periyot ve büyütme  $V_{S30}$ ' lar ile ilişkisi irdelenmiştir. Bu alt başlıkta da, tasnif edilen sismojenik bölgeler ve ardından tüm Ulusal ağ için istasyonlara  $V_{S30}$ 'lar ile tepki spektrumlarından hesaplanan büyütme ve baskın periyotların doğrusal en küçük kareler yöntemiyle ilişkilendirilerek deneysel sonuçlar üretilmiş ve kullanılabilirliği irdelenmiştir.

Şekil 5.11'de görülen her bir bölgeye ait istasyonlardaki zemin baskın periyotları ve  $V_{S30}$ 'lar logaritmik ölçekte ilişkilendirilerek doğrusal denklem ve uyum ilişki katsayıları belirlenerek grafikler üzerinde sergilenmektedir. Uyum doğrularında zemin baskın periyotlarının artmasıyla  $V_{S30}$ 'larda da bir azalım değişimi olduğu açıktır. Uyum ölçütü  $R^2$  0.2-0,35 arasında değişmektedir. Güvenlik sınırları dışında kalan uç değerler ilişki katsayısını azaltmaktadır.

Şekil 5.11'de bölge bazlı incelemelerin ardından tüm istasyonlara ait spektral şekillerden elde edilen değerlere ait sonuçlar gösterilmektedir. Bu durumda da düşük uyum ilişki katsayısı ( $R^2=0,25$ ), çalışmada periyot ve  $V_{S30}$  ilişkilendirilmesinin zayıf bir yaklaşım olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

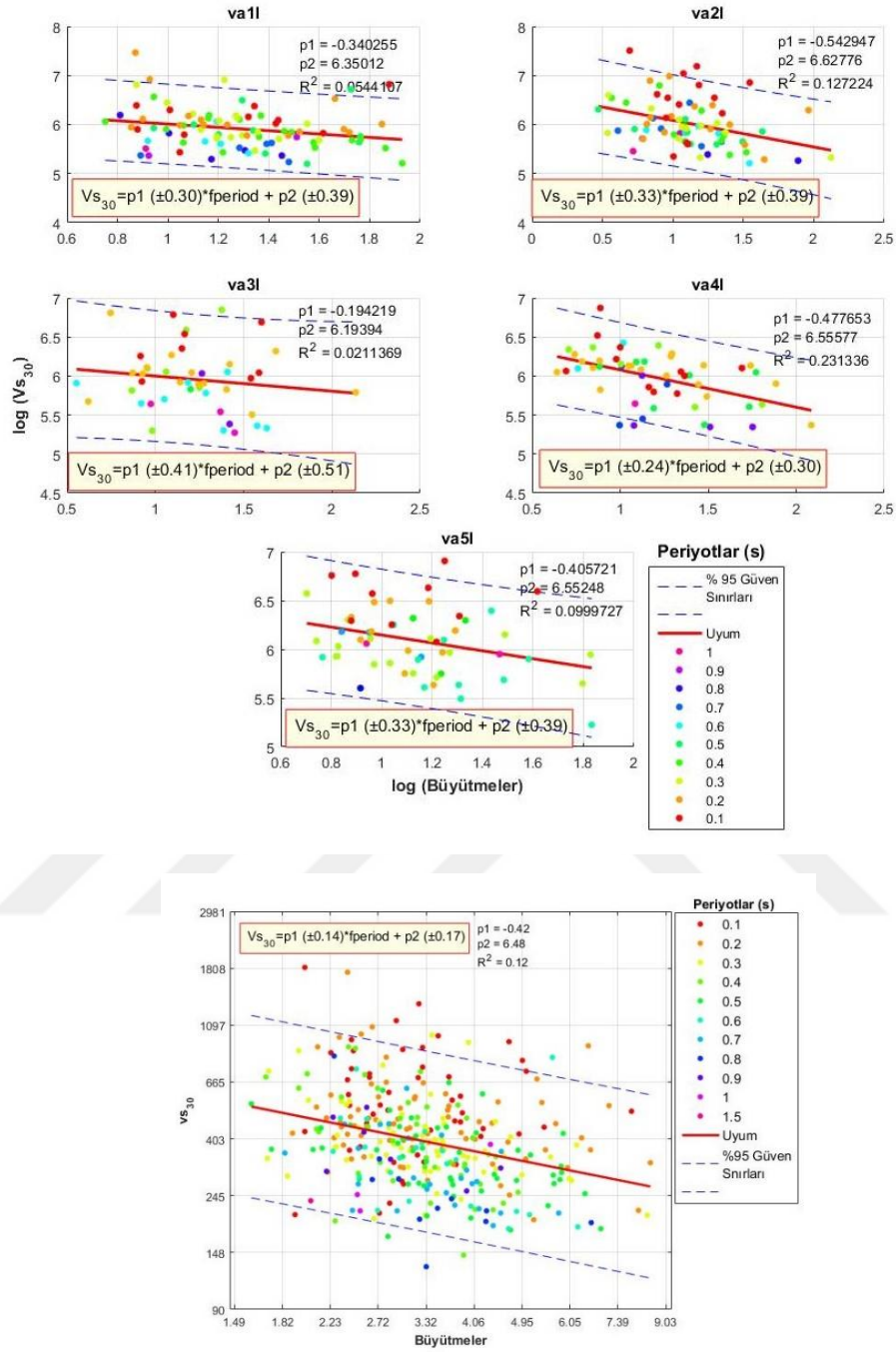


Şekil 5.11. Her bir bölgeye ve tüm Ulusal ağı ait istasyonlardaki hesaplanan  $Vs_{30}$  ve baskın periyotların uyumları. Kırmızı kalın çizgiler kestirilen doğruyu, renkli noktalara baskın periyotları ve onlara karşılık gelen spektral oran genliklerini göstermektedir. Kesikli mavi çizgiler %95 güven sınırlarını temsil etmektedir. Her bölgeye ve tüm Ulusal ağı ait uyumun istatistiksel parametreleri ve denklemler şekil kutucuklarında gösterilmiştir.

Aşırı değerlerin güvenilirlik sınırlarını aşması istasyonda ölçülen yüksek kesme dalgalarından kaynaklanmaktadır. Bunun nedeni sedimanı örten sığ bir sentetik formasyondan veya tersi durumlar için daha derin bir etkiden kaynaklı olmasıdır. İstasyonlara ait jeolojik bilgiler genel bir sınıflamayla verildiği için derinlik ve tabaka bilgisi burada kritik önem arz etmektedir.

Büyütmeye etki eden zemin tabaka kalınlıkları, büyütmelerin  $V_{S30}$  kestirimini güç kılmaktadır. Teoride doğrusal uyum ve ilişki katsayısı daha yüksek beklenebilir fakat analitik çözümlerin ideal homojen ortamlara dayanmasından kaynaklı bu durum, gerçek gözlenen değerlerin ışığında varılan sonuçlar ile örtüşmemesini ortaya çıkarmaktadır ve olağandır. Daha önce de vurgulandığı gibi heterojen yer altı yapısı bu beklenen doğrusal ilişkiye engel olmaktadır. Bölge bazlı çalışmanın amacı farklı sonuçlar ile ilişkiyi özerkleştirmektir fakat uyumların düşük çıkması hedeflenen özerkliği sağlayamadı. Diğer çalışmalarda da benzer uyum ilişki katsayıları hesaplanmış ve ilişki kaba bir yaklaşım olarak onaylanıp önerilmiştir. Fakat, bu tez kapsamında bu tarz zorlama doğrusal ilişkilerin yerine ortalama spektral şekillerin genlik ve baskın periyot uyumları üzerine bir sınıflamaya gidilecektir.

Şekil 5.12’de de spektral şekillere ait büyütmeye değerleri ve  $V_{S30}$  ilişkisi aynı yöntemle irdelenmiştir. Görüldüğü gibi büyütmeler ile ilişkiler zemin baskın periyotlar ile olan ilişkilere nazaran çok daha uyumsuzdur.  $R^2$ ’lerin çok düşük çıkması 30 metre derinlikli makaslama dalgası hızlarının büyütmelerle doğrusal bir ilişki olmadığını gösterebilir.



Şekil 5.12. Her bir bölgeye ve tüm Ulusal ağa ait istasyonlardaki hesaplanan  $V_{s30}$  ve büyüme uyumları. Kırmızı kalın çizgiler kestirilen doğruyu, renkli noktalara baskın periyotları ve onlara karşılık gelen spektral oran genliklerini göstermektedir. Kesikli mavi çizgiler %95 güven sınırlarını temsil etmektedir. Her bölgeye ve tüm Ulusal ağa ait uyumun istatistiksel parametreleri ve denklemler şekil kutucuklarında gösterilmiştir.

## 5.4.Ortalama Spektral Şekiller

Türkiye Ulusal kuvvetli yer hareketi ağında bulunan 792 istasyonda en az üç deprem kaydeden istasyon sayısı 701'dir. Sismik zemin sınıflamasına temel teşkil edecek bu istasyonlarda kaydedilen depremlere ait ortalama spektral şekiller, her bir depremin ve bileşenin tek serbestlik dereceli %5 sönümlü tepki spektrumları hesaplanarak harmonik ortalamaları elde edilmiştir. Tüm hesaplamalarda çeşitli ortalama türleri sınanmış olup, harmonik ortalama ile oluşabilecek uç değerli baskın piklerin etkisinin azaltılması amaçlanmıştır. Ortalama spektral şekiller hem bölgeler hem de genel olarak üretilmiştir. Litolojilere,  $V_{s30}$ 'lara ve zemin baskın periyotlarına göre üretilen ortalama spektral şekiller, Bölüm 6'da önerilen zemin sınıflama algoritmasına temel teşkil etmektedir.

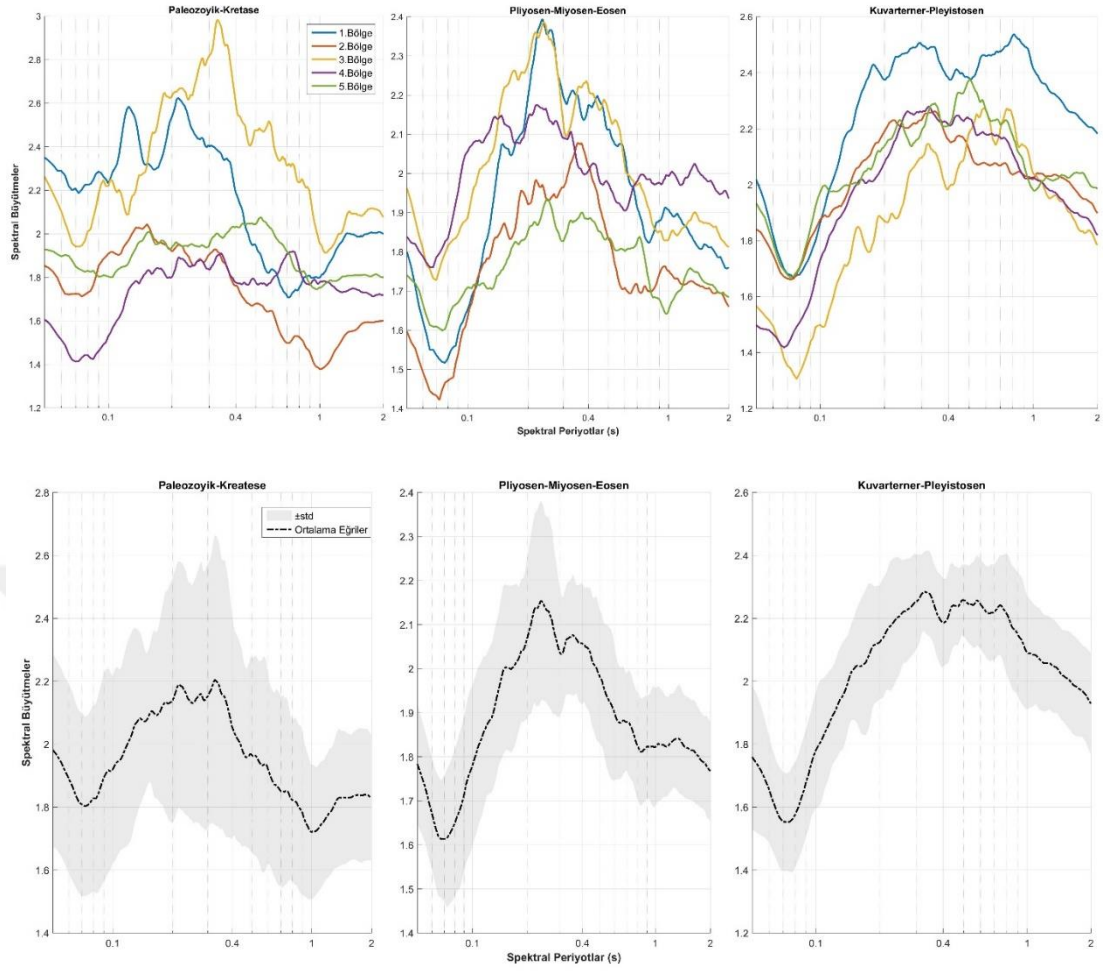
Ortalama spektral şekiller, istasyonda kaydedilen ve belirlenen kıstasları başarıyla geçen sinyallerin her birinin spektrumu hesaplanarak üretilir. En yüksek belirgin büyütme değerine karşılık gelen spektral periyotlar baskın zemin periyotları olarak belirlendikten sonra ortalamaları alınır ve spektral periyotların ve büyütmelerin standart sapmaları da hesaplanır. Periyodik bazlı ortalama şekiller üretilirken belirgin baskın spektral büyütme ve %95 güven aralıklarını aşmayan spektrumlar kullanılmıştır. İlk aşamada örnek alınan periyot aralıkları JRA üzerinden geliştirilen aralıklardır (Zhao ve diğ., 2006; Di Alessandro ve diğ., 2012).

Çoklu pik ve tanımlanamayan spektral şekil eğrileri de ayrı sınıflanıp belirgin piklerden ayrıştırılmıştır. Bu sayede spektral büyütme ve periyotlar ve karşılık gelen standart sapmalar da belirlenerek TR-KYH ağı için yeni periyot aralıkları önerilmiştir.

### 5.4.1. Jeolojik ve Litolojik temelli spektral şekiller

Jeolojik yaş ve litoloji bilgisi mevcut olan 331 istasyonun 5 ayrı sismojenik bölge için ve Türkiye geneli için spektral şekilleri incelenmiştir. Hesaplanan spektral oranlar yaş ve litolojik sınıflara ayrılarak üst üste çizdirilip biçimsel bir düzen olup olmadığı araştırılmıştır.

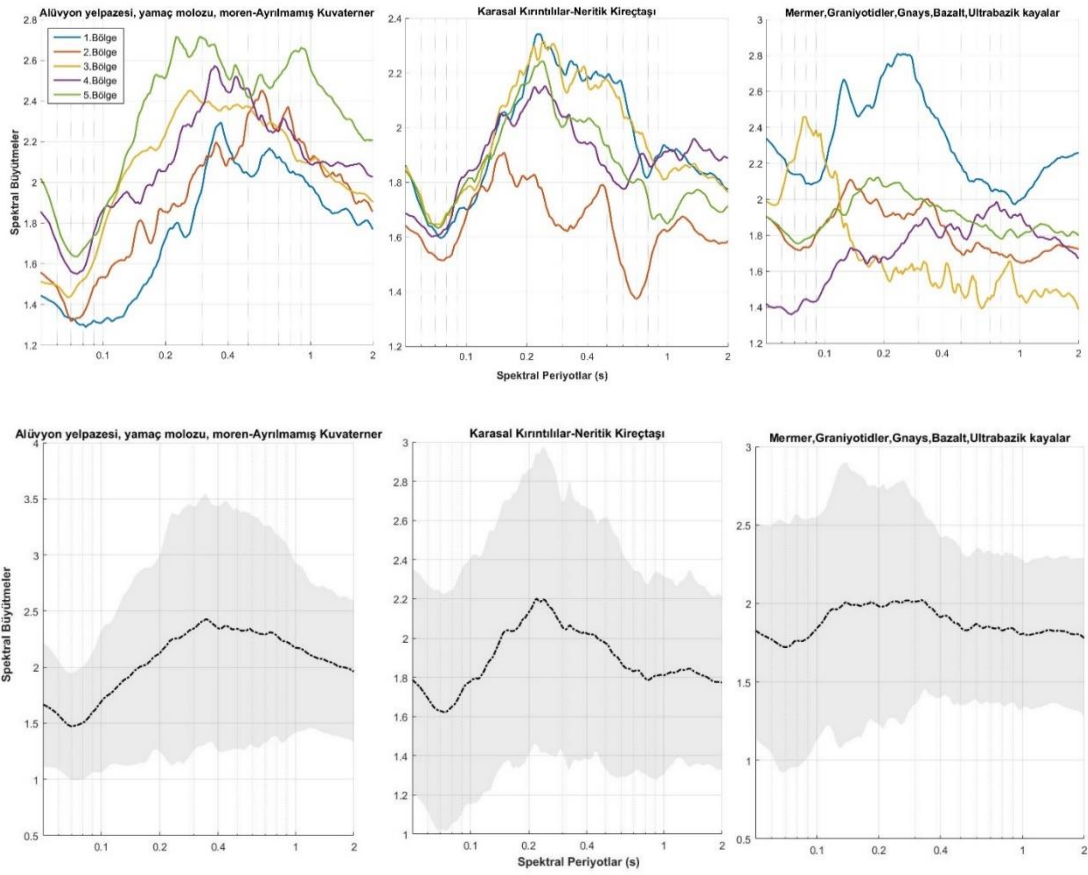




Şekil 5.13. Sismojenik bölgelere göre jeolojik yaş temelli spektral şekiller (üstte) ve %95 güvenilirlik bandı içerisinde ortalamaları (altta)

Paleozoyik-Kretase yaş grubunda spektral şekillerin oluşturduğu biçimsel düzenler bölgelere göre farklılık gösterirken Pliyosen ve Kuvarterner grubunda nispeten düzenli izgeler görülmektedir. Daha yaşlı birimlerde spektral şekiller ait standart sapmalar fazla ve belirgin bir eğri sergilemezken Pliyosen yaşlı birimler daha az sapma ve belirgin bir eğri sergilemektedir. Kuvarterner birimlerde ise standart sapmalar nispeten az iken eğir belirgin karakteristiği teşkil etmemektedir.

Litoloji temelli spektral şekiller incelediğinde bölgeler arası küçük farklılıklar göze çarpmaktadır (Şekil 5.14).

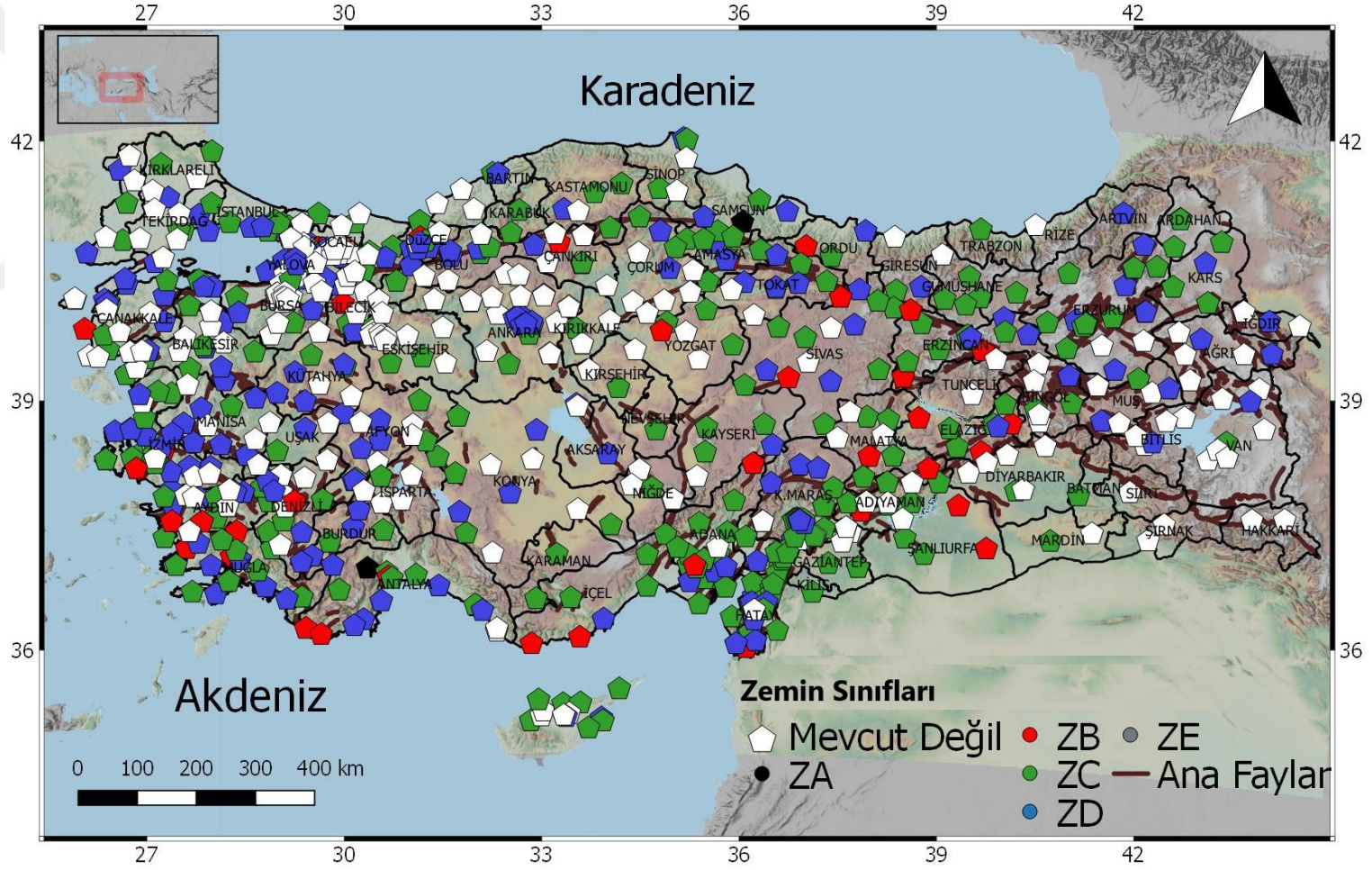


Şekil 5.14. Sismojenik bölgelere göre litoloji temelli spektral şekiller (üstte) ve %95 güvenilirlik bandı içerisinde ortalamaları (altta)

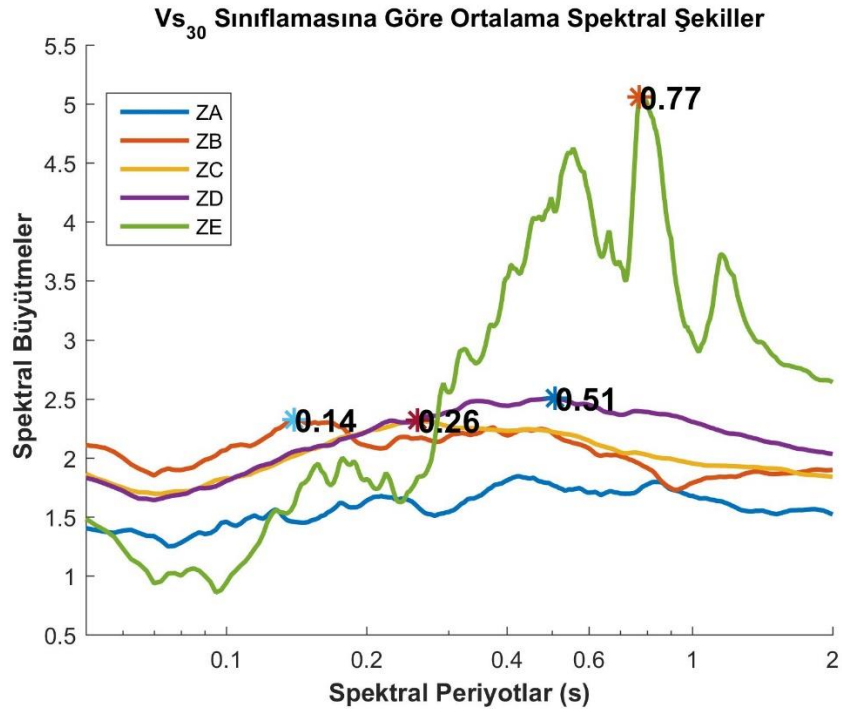
Daha ayrılmış az konsolide (pekişmiş) örtü formasyonlarında yüksek periyotlara ve büyütmelere doğru bir eğilim beklenirken daha rijit zeminlerde belirgin olmayan spektral şekiller belirlenmiştir (Şekil 5.14). Alüvyon yelpazesi, yamaç molozu, moren-ayrışmamış Kuvaterner birimlerde baskın büyütmeler  $2,42 (\pm 1,1)$  de ve periyotlar  $0,35 \text{ s} (\pm 0,2)$  aralığındadır. Karasal kırıntılı birimlerde ise büyütmeler  $2,2 (\pm 0,77)$  de ve periyotlar  $0,22 \text{ s} (\pm 0,15)$  aralığındadır. Kesme dalga hızı nispeten yüksek örtü birimlerde ise belirgin olmayan eğri biçimi görülmektedir (Şekil 5.14). Karasal kırıntılar, alüvyon yelpazesi, yamaç molozu gibi birimlerde karakteristik spektral şekiller gözlenmekle birlikte her üç litolojide de standart sapmalar jeolojik yaşlara nazaran baskın periyotlara  $\pm 0,1 \text{ s}$  daha azdır. Büyütmelerde görülen standart sapmalar ise (gölgeli alanlar) litoloji temelli spektral şekillerde daha fazladır ( $\pm 1,3$ ).

#### 5.4.2. Baskın Periyot Ve $V_{s30}$ Temelli Spektral Şekiller

Türkiye kuvvetli yer hareketi istasyon ağında (TR-KYH) otuz metre derinlikteki ortalama kesme dalga hızları ( $V_{s30}$ ) bilinen 557 istasyon, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki (TDBY) yerel zemin sınıflarına göre ve  $V_{s30}$  bilgisi mevcut olmayan 235 istasyon Şekil 5.15’de haritada sergilenmektedir. Bu istasyonlarda analiz edilen yaklaşık on altı bin kaydın ortalama spektral şekilleri yerel zemin periyot aralıklarına göre tasniflenip elde edilmiştir (Şekil 5.16). ZA yerel zemin sınıfına ait spektral şekilde büyütme oranının ikinin altında olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle mozaik yapılar üzerinde gürültü ölçümlerinin analizi sonucu elde edilen spektral şekillerde ( $h_{vnr}$ ) gözlemlenmektedir. Spektral büyütme oranının ikinin altında olması yerel zemin koşullarına ait masif kayaların uzanım formasyonlarına ait kontrast (zemin tabakaları arasındaki empedans farkı) farkından kaynaklanmaktadır ve dalga genliklerinin düşeyde de fazla soğrulduğuna işaret eder. Yakın alan deprem sinyallerinin çözümünde bu durum pek rastlanmasa da bazı istasyonlarda söz konusu kuvvetli soğrulma yüksek hızlı ve kalın kayaç formasyonlarında görülebilmektedir.



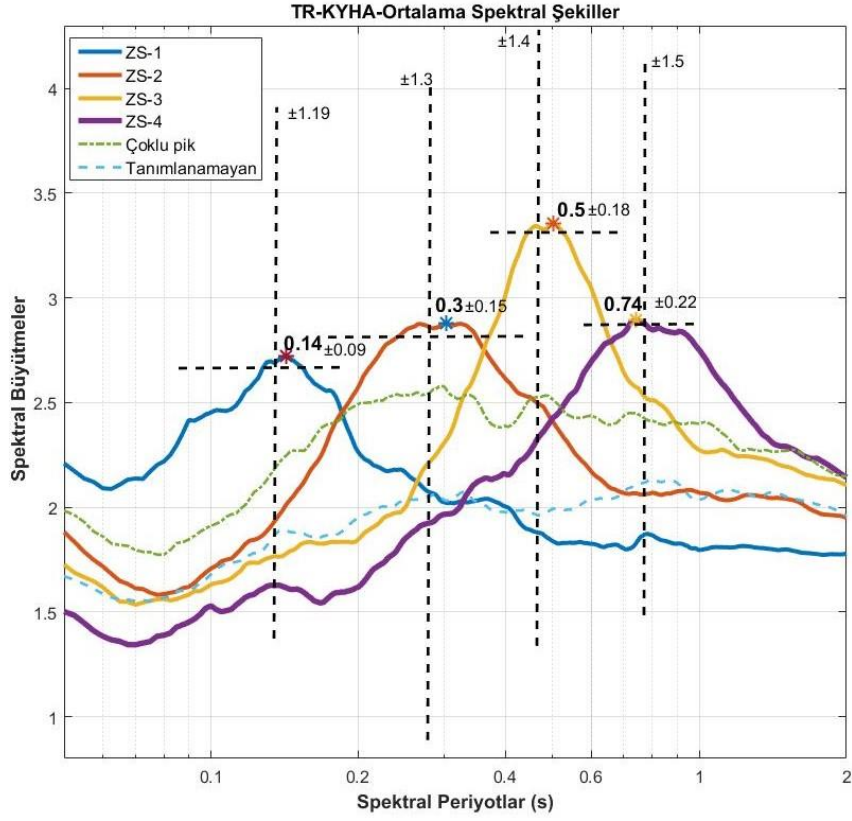
Şekil 5.15. TR-KYH' ağına ait bilinen yerel zemin sınıfları ve zemin sınıfları henüz belirlenmemiş istasyonlar



Şekil 5.16. Yerel zemin sınıfları temelinde hesaplanmış ortalama spektral eğriler

Yerel zemin sınıflarına esas hesaplanan ortalama spektral eğrilerde zemin baskın periyotlarının benzer çalışma ve yönetmeliklerde elde edilmiş olan değerlerden farklı olduğu görülebilmektedir. Özellikle ZE zemin sınıfına ait büyütme ve ona karşılık gelen baskın periyot yüksek mertebelere işaret etmektedir ve deprem yönetmeliklerinde yerel zemin şartlarının ve tasarım spektrumlarının esasını teşkil eden zemin etki katsayıları hesaplanırken bu etki mutlaka göz ardı edilmemelidir.

Tez çalışmasının en önemli sacayağı olan zemin baskın periyotları temelli hesaplanan ortalama spektral şekiller Şekil 5.17’de gösterilmektedir. Üretilen spektral eğriler, ilk etapta Zhao ve diğ., (2006) ve Di. Alessandro (2012) çalışmalarında temel alınan periyot aralıklarına göre hesaplanmıştır. Güvenilir ve belirgin pikler gösteren dört grup zemin sınıfına ait eğriler, çoklu pikler ve tanımlanamayan eğriler olmak üzere zemin sınıfları (ZS) toplam altı grupta tasniflenmiştir.



En az üç deprem kaydeden yedi yüz bir (701) istasyonda on altı bin yüz kırk yedi (16147) kayıt analiz edilerek hesaplanan spektral eğriler özdeş çalışmalara göre yüksek sinyal kalitesi ve sayısı ile ayırt edici özelliğe sahiptir. Zemin baskın periyotları, büyüklükleri ve onlara karşılık gelen standart sapmaları benzer çalışmalarla küçük farklılıklar gösterse de spektral şekillerin genel eğilimi örtüşmektedir. Ayrıca, bu derece kapsamlı ve büyük veri seti kullanılarak denk koşullarda (ön eleme, sayısal süzgeç, s/g oranları vb.) ve disiplinli bir veri işlem sürecinden sınanarak oluşturulan spektral şekiller baskın periyot bazlı sınıflamada güvenilirliği ve gerçekliği artırır niteliktedir. Bu bağlamda önerilen zemin baskın periyot aralıkları Tablo 5.2’de sergilenmektedir. Böylece Tablo 5.2’de hesaplanan kriterlerin de yardımıyla istasyonlara ait zeminlerde kaydedilen deprem sinyalleri ile zemin sınıflama yöntemi ve akışı, gerekli altlıkları teşkil eden spektral şekiller üretilip değerler hesaplandıktan sonra artık zeminlerin hem  $V_{s30}$  hem de periyot bazlı spektral

eğriler üzerinden kestirimine ve karşılaştırılmasına Bölüm Altı itibariyle geçilme aşamasına gelinmiştir.

Tablo 5.2. Çalışma kapsamında önerilen zemin sınıfları (ZS), periyot aralıkların (P) ve büyütme değerleri

<b>Zemin Sınıfları ve Periyot aralıkları</b>	<b>Doğal salınım periyotları (s)</b>	<b>Spektral Büyütmeler</b>
ZS-1 P1	$T_0 < 0,14$	HVSR = 2,72 ( $\pm 1,19$ )
ZS-2 P2	$0,14 \leq T_0 < 0,32$	HVSR = 2,88 ( $\pm 1,3$ )
ZS-3 P3	$0,32 \leq T_0 < 0,52$	HVSR = 3,35 ( $\pm 1,4$ )
ZS-4 P4	$0,52 \leq T_0 < 0,74$ $T_0 > 0,74$	HVSR = 2,9 ( $\pm 1,5$ )
Çoklu pik	Geniş periyot aralıklarında birden fazla belirgin pik sergileyen eğriler	-
Tanımlanamayan	İkiden düşük spektral büyütme ve geniş periyot aralıklarında belirgin pik sergilemeyen eğriler	HVSR < 2

## 6. ZEMİNLERİN SINIFLANDIRILMASI

Global ve yerel ölçekte, yeryüzünün sismik aktivitesi deprem istasyon ağlarıyla sürekli izlenmektedir. Yerel ağlar, IRIS (Sismolojik Araştırma Enstitüsü) ve USGS (Amerikan Jeoloji Araştırma Kurumu) gibi küresel ağlarla birlikte araştırmacılara sismik veriyi sunarak sismik tehlike ve mühendislik çalışmalarının gelişimine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda AFAD tarafından işletilen Türkiye Ulusal Kuvvetli yer hareket ağı (TR-KYH) Avrupa İtalya'dan sonra en kapsamlı istasyon sayısı ve veri erişebilirliğine sahiptir. Deprem istasyonlarında kaydedilen veriler herhangi bir kullanıcı kaydı oluşturmadan Dünyanın herhangi bir yerinden ulaşmak isteyen araştırmacılara açıktır. TR-KYH ağında 236 istasyona ait zemin sınıf çalışmaları konvansiyonel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve istasyonlar EC-8 ve NEHRP' e göre sınıflandırılmıştır (Sandıkkaya ve diğ., 2010).

Bilindiği gibi, sismik tehlikelerin azaltılmasına dair çalışmalarda ve bununla ilişkili mühendislik amaçlı çalışmalarda istasyonların zemin bilgisi önemli bir yere sahiptir. Sismik tehlike kapsamında yer hareketi kestirim denklemlerinin oluşturulması ve zemin üzerine inşa edilecek yapıların tasarım spektrumlarının hesaplanmasında zemin bilgisi elzemdir. Zeminlerin nasıl sınıflandırılacağı ve etki katsayıları deprem yönetmeliklerinde genel hatlarıyla verilmektedir. Dünya'da genellikle konvansiyonel sınıflama yaklaşımı olan kesme dalga hız aralıkları kullanılmaktadır. Bu sınıflamalarda genelde, yapay kaynakla oluşturulan dispersif özellik gösteren akustik dalga fazlarının yere serilen jeofonlarla zaman ortamında algılanması ve model zemin özellikleri ile iteratif ters çözüm sonucu kesme dalga hızlarının elde edilmesi sonucu ortamın sıklığı ile ilişkilendirilmesine dayanır. Veri toplama ve işleme süreci titizlik, zaman ve masraf gerektiren bu süreç ters çözüm algoritmalarının doğası gereği oluşturduğu iraksama/yakınsama belirsizlikleri ile de bazen hatalı sonuçlar üretir. Dolayısıyla önerilen bu tezin amacı doğrultusunda hem zaten istasyonlarca kaydedilen deprem verileri kullanılarak deneysel bir sınıflama önerisi sunmak hem de  $V_{s30}$ 'lara göre üretilen spektral şekiller ile bilinmeyen zeminlerin deprem yönetmeliğine göre



belirtilen yerel zemin sınıflarına göre kestirmek zaman ve masraflar bakımından oldukça verimli bir durum analizi ortaya konulacaktır.

### **6.1. Deprem Yönetmelikleri Kapsamında Zeminlerin Sınıflandırılması**

Sismik zemin sınıflamalarına ilişkin Bölüm 3’de detaylı bir inceleme yapılmıştı. Bu alt başlıkta sismik zemin sınıf belirlemelerine yönelik periyot bazlı ve konvansiyonel sınıflama üzerinden spektral şekillere ait sonuçlar irdelenecektir. Zeminleri mekanik ve sismik bazlı sınıflara ayırma işleminin ana amacı yerel zemin sınıflarına bağlı yerel zemin etki katsayılarını kullanarak yapılara etkiyen spektral ivmelerin ne kadar büyütüleceği ve sönümleneceğini kestirebilmektir. Bu süreçte deprem yer hareketi spektrumları belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için harita spektral ivme katsayılarına, faya yakınlık katsayısına ve yerel zemin katsayılarına bağlı olarak tanımlanır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında bakılacak olursa tasarım spektral ivme katsayıları kısa periyot ( $<1$  sn) ve 1 saniye periyodlar için referans zemin koşulu ( $V_s=760$  m/sn) esas alınarak hesaplanır (TDBY,2018). Burada elastik tasarım tepki spektrumları ivme kayıtlarının yatay bileşenleri için modellenir.

Deprem etkisi altında temel zemini ve temellerin tasarımı için özel kurallar başlığı altında Zemin ve Temel Etüd raporları, zemin parametrelerini belirlenmesi, sıvılaşma risklerinin değerlendirilmesi, doğrusal olmayan serbest zemin modeli ve deprem analizinde yerel zemin sınıfları kullanılmaktadır. Peki, yönetmeliklerde bu yerel zemin sınıflarının neye göre belirlenir? TDBY ve EC-8 yönetmelikleri birbirine benzemektedir ve şu üç parametreye göre belirlenir:

Üst 30 metredeki ortalama;

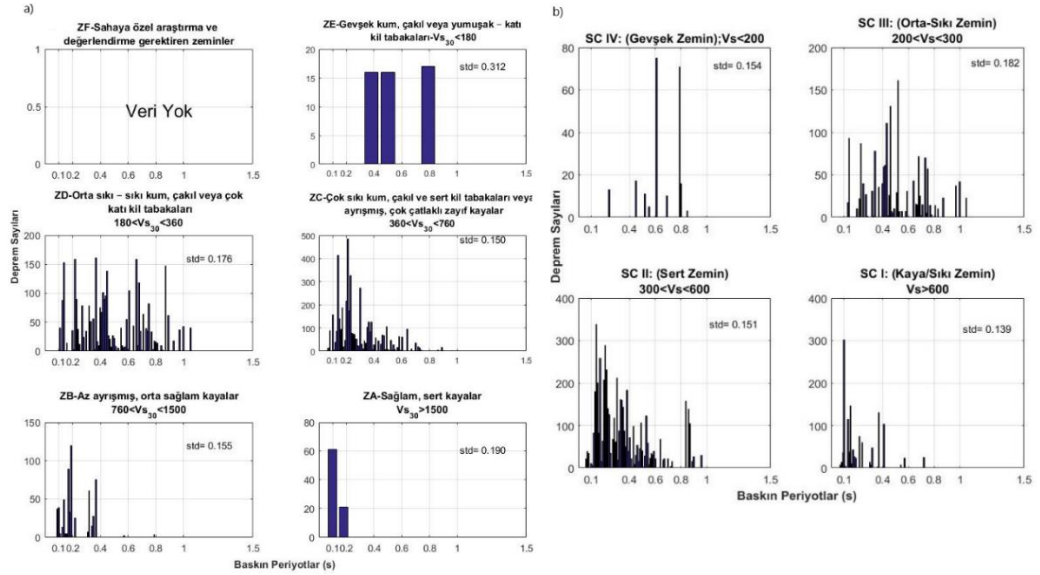
- 1- Kayma dalgası hızı ( $V_{s30}$ )
- 2- standart penetrasyon darbe sayısı ( $(N_{60})_{30}$ )
- 3- drenajsız kayma dayanımı ( $(c_u)_{30}$ )

Bunlarda ikisi mekanik deneysel nitelikler olup kesme dalga hızı da dolaylı bir dayanım göstergesidir. Yönetmelik hangi üçü kullanılır ve hepsi mi kullanılır hususunda bir kıstas koymamıştır. Japon deprem yönetmeliğinde de TDBY’de olmayan zemin baskın periyot aralıkları mevcuttur (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. Mühendislik tasarım çalışmaları için Japon Zemin sınıfı karakteristikleri ve bunlara karşılık gelen Türk ve Amerikan yönetmeliklerinin eşdeğer sınıfları (Japan Road Association, 1990; NEHRP,2001; TBDY,2018)

Z.Sınıfları	Doğal salınım periyotları (s)	Ortalama S dalga hızları	NEHRP	Vs <sub>30</sub> ve karşılık gelen TBDY sınıfları	
SC I	TG < 0.2s	Vs <sub>30</sub> > 600 m/sn	A + B	> 1500	ZA
SC II	0.2s ≤ TG < 0.4s	300 m/sn ≤ Vs <sub>30</sub> < 600 m/sn	C	760 – 1500	ZB
SC III	0.4s ≤ TG < 0.6s	200 m/sn ≤ Vs <sub>30</sub> < 300 m/sn	D	360 – 760	ZC
SC IV	0.6s ≤ TG	Vs <sub>30</sub> < 200 m/sn	E	180 – 360	ZD

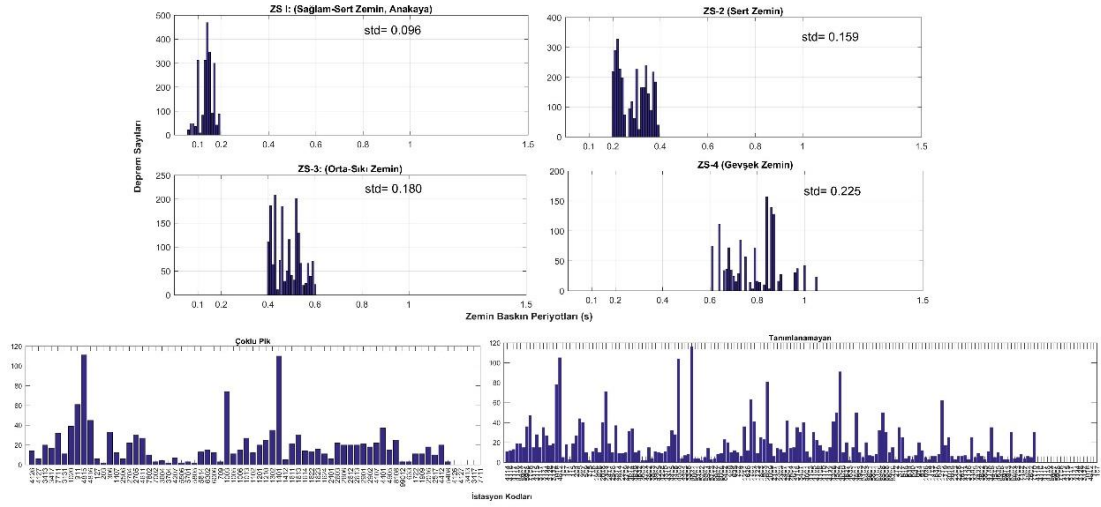
Bu kapsamda Vs<sub>30</sub> bilgisi olan 557 istasyon TDBY, belirgin pikler gösteren 473 istasyonda baskın periyot tabanlı tasnifi de Japon yönetmeliklerinde belirlenen sınıflara göre sırasıyla Şekil 6.1a ve b’de resmedilmiştir.



Şekil 6.1. Kesme dalga hızı tabanlı baskın periyotların TDBY’ye göre (a) ve JRA’ya (b) göre histogramları.

Şekil 6.1a incelendiğinde KYH istasyonlarına ait ZE zemin sınıfına ait yalnız üç istasyon bulunmaktadır. ZE sınıflamasındaki istasyonlarda 0,4-0,8 sn aralığında değişirken baskın periyotlar 48 adet deprem verisinin analizi sonucu 0.31 olarak standart sapmaya sahiptir. ZF zemin sınıfı sahaya özel tasarım spektrumu, sıvılaşma analizi gibi özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zemin sınıfıdır. ZD sınıflarına denk gelen baskın periyotlar 0,1-ve1,1 saniye aralığında değerler almaktadır. Bu istasyonlara denk düşen tepki spektrumlarından hesaplanan zemin baskın periyotlarının standart sapması 0,17 olarak hesaplanmıştır. Bu geniş periyodik aralık 0,4 sn'den küçük değerler için kesme dalgasına göre sınıflamayla tezat oluşturduğu ve problemin sığ ve derin sediman etkiden kaynaklandığı daha önceki bölümlerde de vurgulanmıştır.

En yoğun istasyon ve dolayısıyla kaydedilen deprem sayısı ZC sınıfında gözlemlenmektedir. 0,1-0,4 sn baskın periyot aralıklarında seyreden bu yoğunluğa ait standart sapma değeri 0.15'dir. Nispeten diğer sınıflara göre düşük standart sapma değeri, ZC zemin sınıfına ait istasyonların zemin sınıfları arasında geçişkenliğe daha az duyarlı olduğunu açıklamaktadır. ZB ve ZA sınıflarındaki istasyonlarda ZC ve ZD sınıflarına göre daha az deprem kaydı görülmekle birlikte zemin baskın periyotları da kesme dalgalarıyla genellikle uyumludur. ZB ve ZA sınıfları JRA SC-I ve SC-II sınıflarıyla uyum içerisinde olduğu görülebilmektedir (Şekil 6.1b).  $V_{S30}$ 'lara göre en yoğun deprem sayıları ve istasyonlar SC-II'ye karşılık gelmektedir ve 0.15 standart sapma değerine sahiptir. Japon ve Türk yönetmeliklerindeki karşılaştırmalardan görülmektedir ki  $V_{S30}$  ve  $T_0$  (zemin baskın periyodu) arasında her sınıf ve periyodik aralıklar için tam bir uyum yoktur. Bu sorun mudur yoksa çözüme dair farklı bir perspektifin geliştirilmesine mi işaret eder sorusunun çözümü bu çalışmada önerilecek olan ortalama spektral şekiller ve baskın periyotlar üzerinden yapılacak sismik zemin sınıflama önerisidir. Bu bağlamda tüm depremlerin çözümü sonucu elde edilen periyot bazlı ortalama spektral şekillere göre (Şekil 5.17) oluşturulan Tablo 5.2'ye göre zeminlerin sınıflandırılması Şekil 6.2'de sergilenmektedir.



Şekil 6.2. Önerilen periyot tabanlı sınıflama ölçütlerine göre deprem sayılarının gösterimi (Periyot eksenini logaritmiştir)

Şekil 6.2’de yansıtılan grafikte çoklu pik ve tanımlanamayan istasyonlar belirtilmektedir. Daha önce de değinildiği üzere İtalya’ya ait ağı sınıflandırılmasında önerilen bu iki sınıf, bazı depremlerin çözümünün belirgin pikler sergilemediği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, çoklu pikler sergileyen istasyonların (altmış beş adet) genelde sonradan oluşturulan asfalt, beton gibi yapay zeminlerin doğurduğu bir anomalidir. Doğal zeminlerde de gözlemlenebilen bu durum ince ve yüksek empedans oranına sahip zemin tabaka farklılıklarında da ortaya çıkabilmektedir. Genlikleri ikinin altında olan ve geniş periyot aralıklarında düz bir tepki veren eğriler için sınıflanan tanımlanamayan gurubu (163 adet istasyon) genelde anakaya üzeri zeminlerde görülse de jeolojik birimlerle dolgu zeminlerin iç içe geçtiği durumlarda da gözlemlenebilmektedir. Bu durumdaki eğri karakteristikleri tespit edilmiş olup bu sınıflara ait zemin etki katsayıları diğer belirgin eğrilere ait sınıflarda olduğu gibi daha az ağırlık verilerek belirlenebilir.

## 6.2.Sismik Zemin Sınıflama Yöntemi

Farklı zemin sınıf şemaları dikkate alındığında, aletsel verileri karşılaştırma ve kontrol etme amaçlı kullanmak daha güvenilir olduğu söylenebilir. Deneysel tabanlı zemin sınıflamalarının güvenilirliği öncelikle yerel yeraltı koşulları hakkında kalifiye ve yeterli bilgiye bağlıdır. Daha öncede belirtildiği gibi, yerel zemin koşulları ile ilgili detaylı bilgi, zemin büyütme özelliklerinin hesaplanmasında önemli bir yere sahiptir ve sismik hareketlere bağlı potansiyel zararların azaltılmasına ışık tutmaktadır.

Bu alt başlıkta, oluşturulan ortalama spektral eğrilerden belirlenen spektral büyütme ve zemin baskın periyotları temelli bir akış şeması izlenerek zemin grupları hem konvansiyonel hem de önerilen periyot bazlı sınıflamalara göre kestirilecektir. Burada ana gövdeyi oluşturan kıstas her bir zemin sınıfına ait ortalama spektral şekilleri denetleyen istatistiksel bir yaklaşım olan Spearman sıralama korelasyon katsayılarıdır.

### 6.2.1. Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı

Bu katsayı -1 ve 1 arasında değişim gösteren, sıralama ve değerler arasında istatistiksel bir bağımlılığa dayanan parametrik olmayan bir ölçüttür (Wolf from, 1999). İki değişken arasında tekdüze bir fonksiyon kullanılarak birbirleri arasındaki ilişkilerini belirler. Pearson katsayısından farklı olarak doğrusal ve doğrusal olmayan değer ilişkilerini belirleyebilir. Değişkenler (x,y) sıralamaya sokularak (rx, ry) kovaryansları hesaplanır ve standart sapmalarına bölünerek elde edilir. (Eşitlik 6.1a).

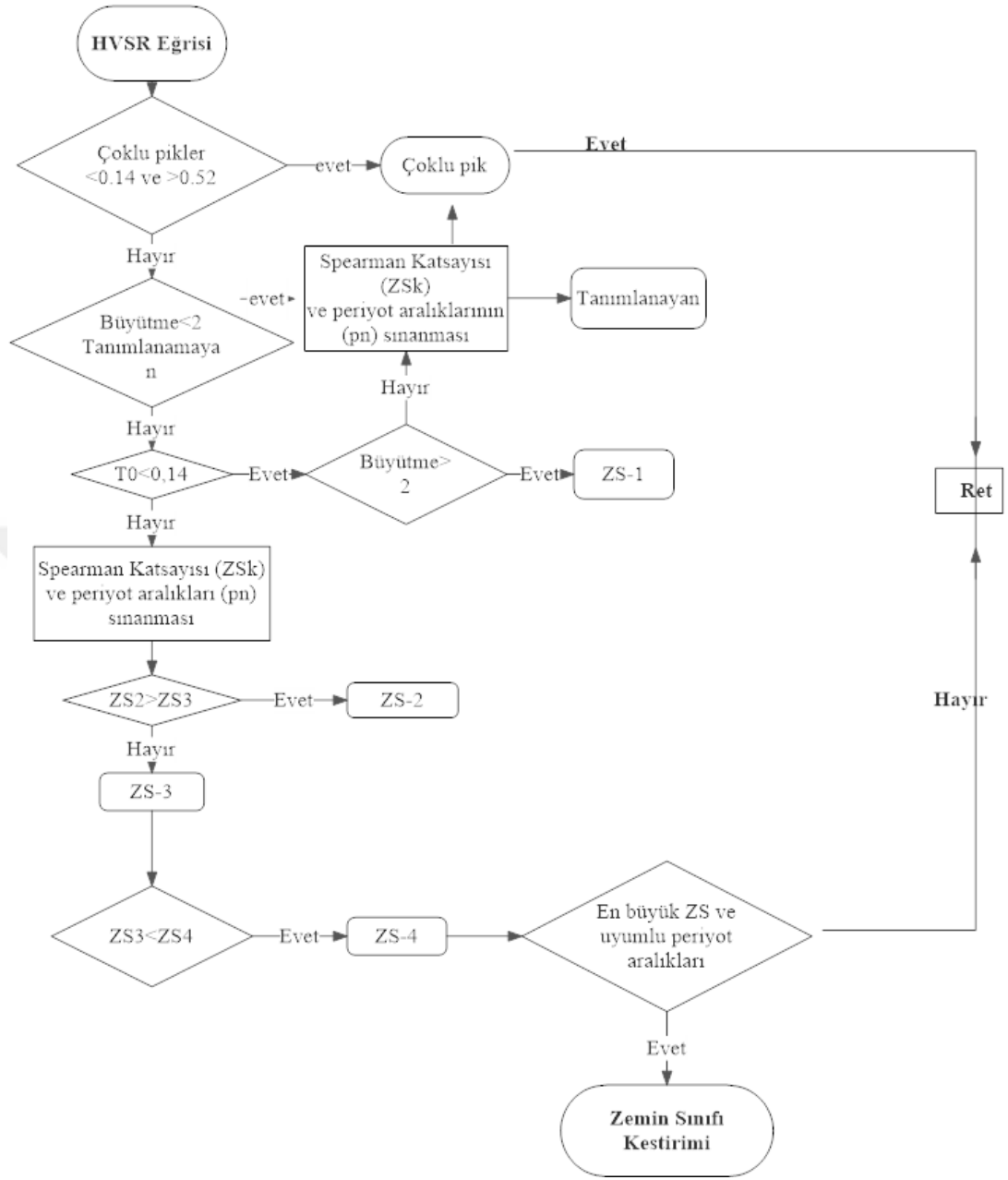
$$\rho = \frac{\text{cov}(rx,ry)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (6.1a)$$

Burada  $\rho$  spearman katsayısını, cov, kovaryansı ve  $\sigma$  da standart sapmaları belirtmektedir.

Bu tez kapsamında  $\rho$  katsayısı zemin sınıf indeksi olarak Eşitlik 6.1b bağlantısında gösterildiği gibi tasarlanıp uyarlanmıştır;

$$ZS_k = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (6.1b)$$

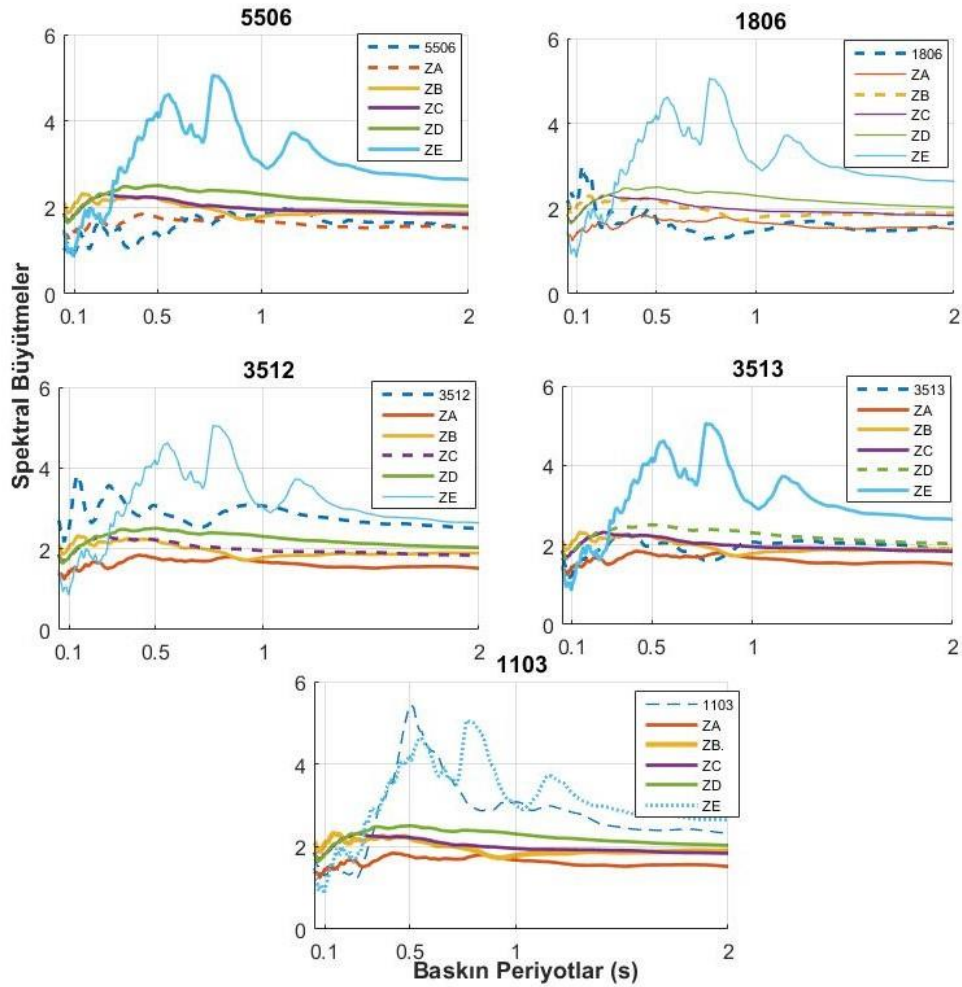
Burada di, i. inci periyot için  $x_k$  ve  $y$  arasındaki farktır.  $x_k$ ,  $k$ . sınıfa karşılık gelen ortalama tasarım HVSR spektral genliklerini ifade ederken  $y$  de hedeflenen zemin için hesaplanmış olan ortalama HVSR spektral genlikleridir.  $n$  ise toplam periyot sayılarını ifade etmektedir. Analiz edilen deprem kayıtları kullanarak hem kesme dalgası hızı tabanlı konvansiyonel zemin sınıfları hem de zemin baskın periyotlarına dayalı zemin sınıf ( $k$ ) eğrileri tasarlanmıştır. Ortalama elastik tepki spektrum oranları ile kestirilmeye çalışılan zemin sınıfına ait ortalama tepki spektrum oranları arasındaki ilişkiyi irdeleyen Spearman katsayısı  $-1$  ve  $1$  arasında değişmektedir.  $ZSk=1$  tam artı uyuma işaret etmektedir. Her sınıf için ayrı ayrı hesaplanan  $ZSk$  katsayıları uyumun en yüksek olduğu değer dikkate alınır. Burada periyot aralıkları kriterleri de göz önüne alınarak zemin sınıflamasına ait akış şeması oluşturulmuştur (Şekil 6.3). Bu bağlamda, hesaplanan bir HVSR eğrisi, tüm ortalama spektral şekillerce spearman korelasyon uyumu ile test edilip aynı zamanda belirgin baskın periyot aralıkları da sağlanırsa zemin sınıfı kestirilir. Bu kestirim TDBY’de belirtilen yerel zemin sınıflarına göre ve önerilen periyot bazlı sınıflama sistemine göre de yapılabilir. Hesaplamalar ve kestirimler MATLAB’de yazılan programlarla yapıp otomatik zemin sınıfları her bir istasyona göre dosyalara yazdırılır (EK-Ç). Uyumların ve kıstasların sağlanmadığı HVSR eğrilerinde zemin sınıfı kestirilmez. Akış şemasında periyot bazlı sınıflama esas alınsa da yerel zemin sınıfları için de yöntem aynıdır.



Şekil 6.3. İstasyon zeminlerinin sınıflandırılmasına ait akış şeması.

### 6.3. Zemin Sınıf Belirlemeleri

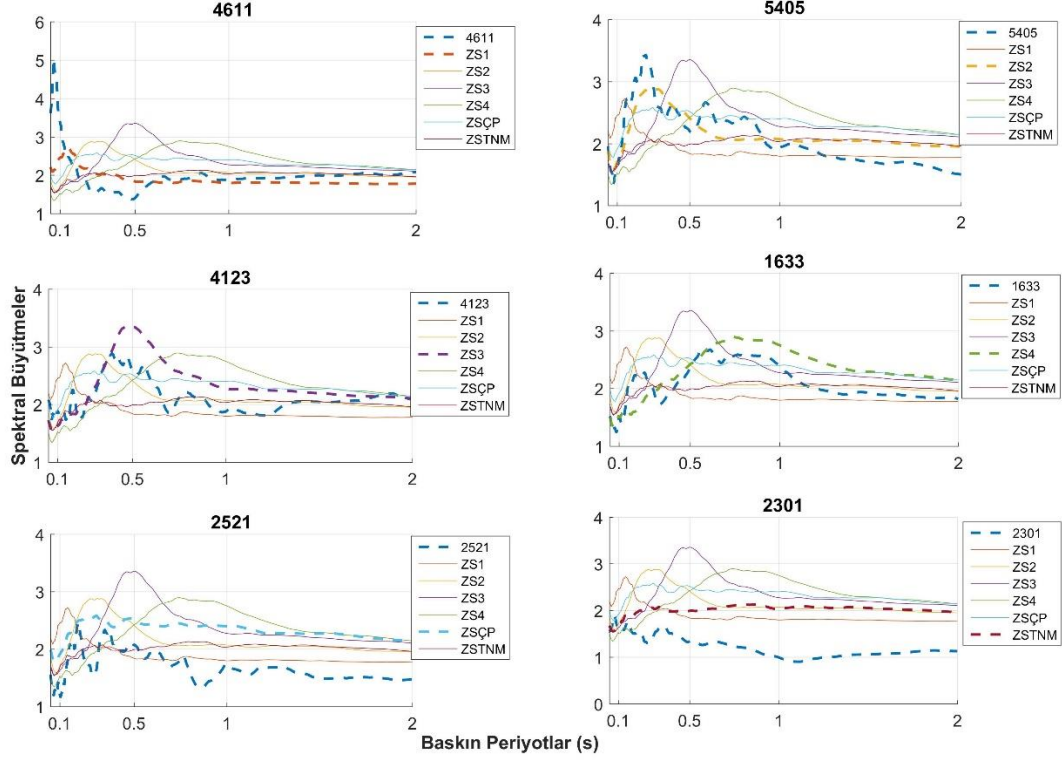
Zemin sınıflarının belirlenmesinde oluşturulan algoritmayı örneklerle şekillendireceğimiz bu bölümde kestirilen yani tahmin edilen ve bilinen konvansiyonel ve önerilen zemin sınıf uyumları da irdelenecektir. Şekil 6.4’da örnekte  $V_{s30}$ ’lara göre üretilen ortalama spektral şekiller baz alınarak 5506, 1806, 3512, 3513 ve 1103’de hesaplanan tepki spektrum oran eğrileri gösterilmektedir. Her bir yerel zemin sınıfı için spektral şekillerin benzerliğine dayanan spearman uyumu ile test edilen istasyonlardaki hesaplanan eğriler ve en yakın benzerlik gösteren zemin sınıfı eğrisi kesikli çizgiler ile gösterilmektedir. Burada her bir sınıf için kestirilen örnekler verilmiştir.



Şekil 6.4. İstasyonlara ait yerel zemin sınıfları kestirimi

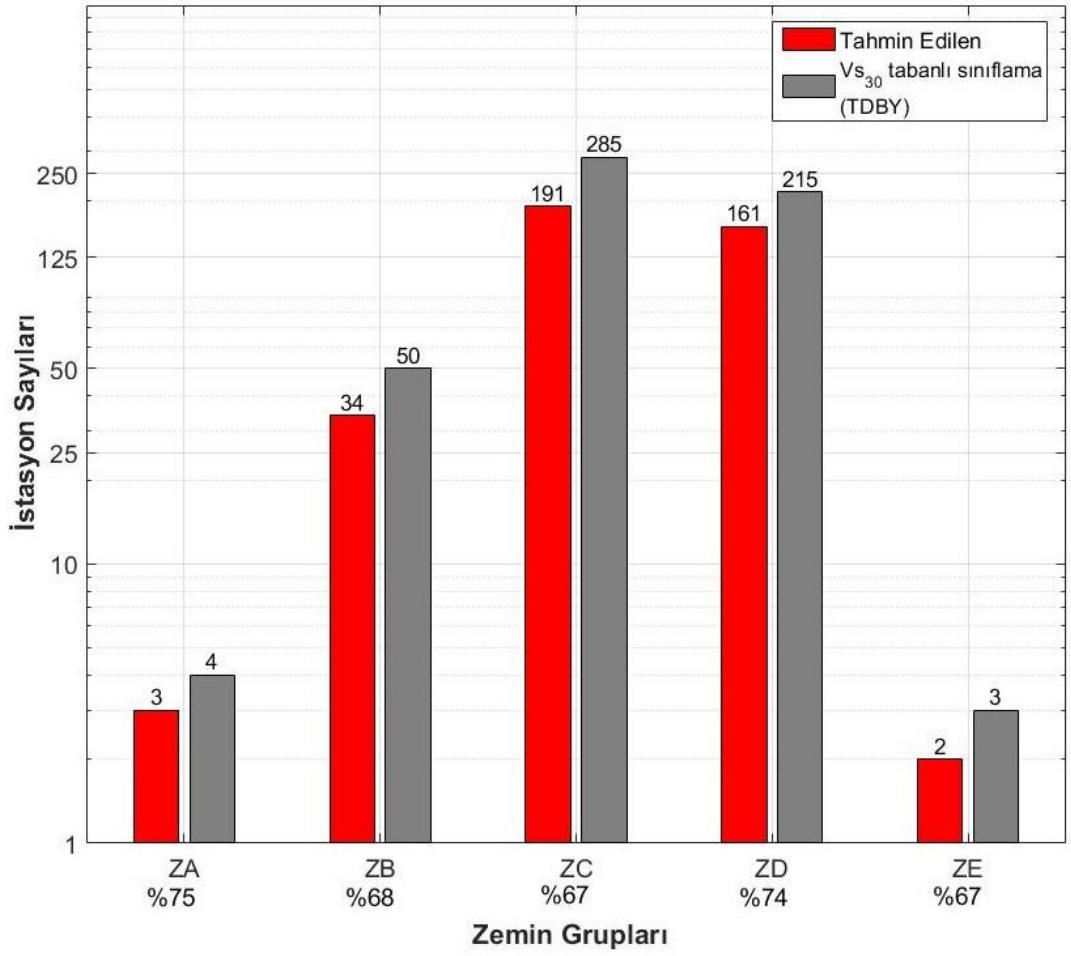


Şekil 6.5’de periyodik temelli önerilen sınıflama için 4611, 5405, 4123, 1633, 2521 ve 2301 kodlu istasyonlara ait zemin sınıf belirlenmeleri sergilenmektedir. Yine her bir zemin grubu için kesikli çizgiler şeklindeki spektral eğriler, istasyona ve hangi zemin sınıfı olarak kestirildiğine dair örnekleri teşkil etmektedir.



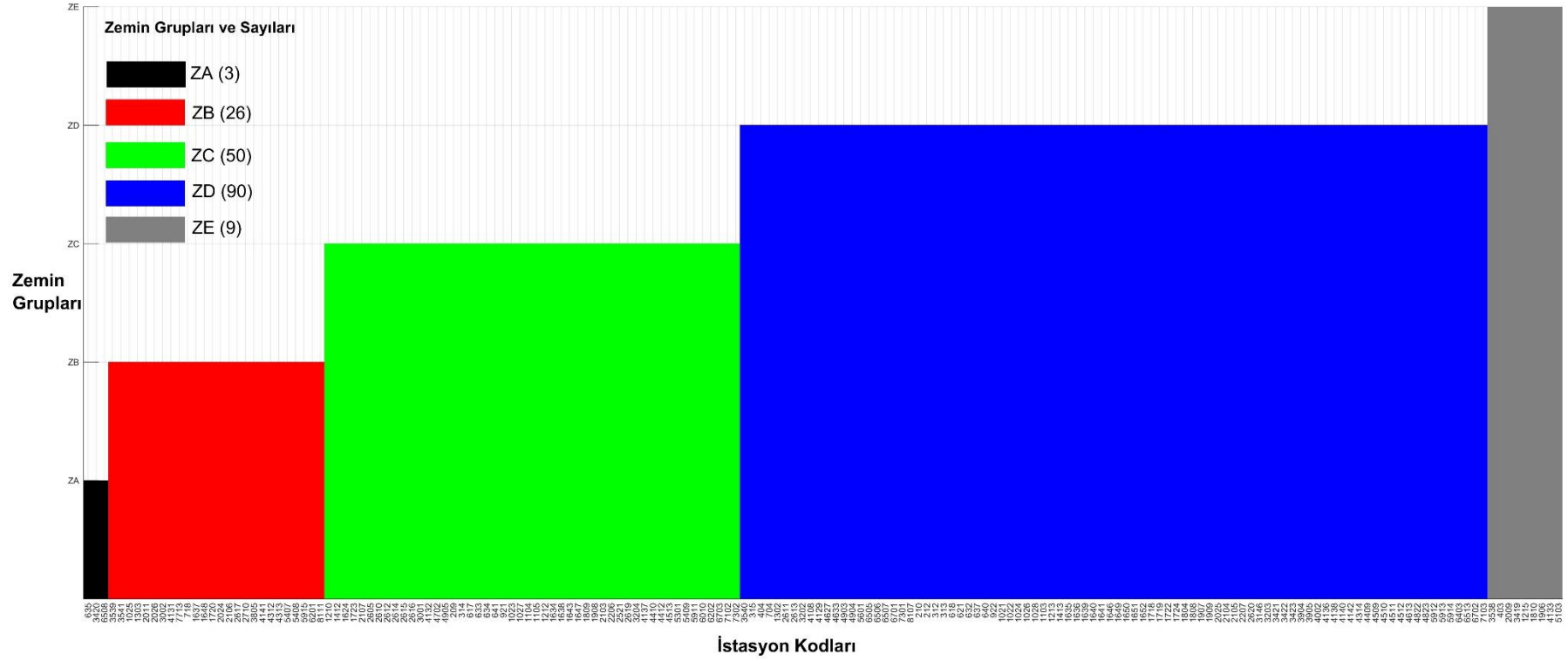
Şekil 6.5. İstasyonlara ait periyot bazlı zemin sınıfları kestirimi

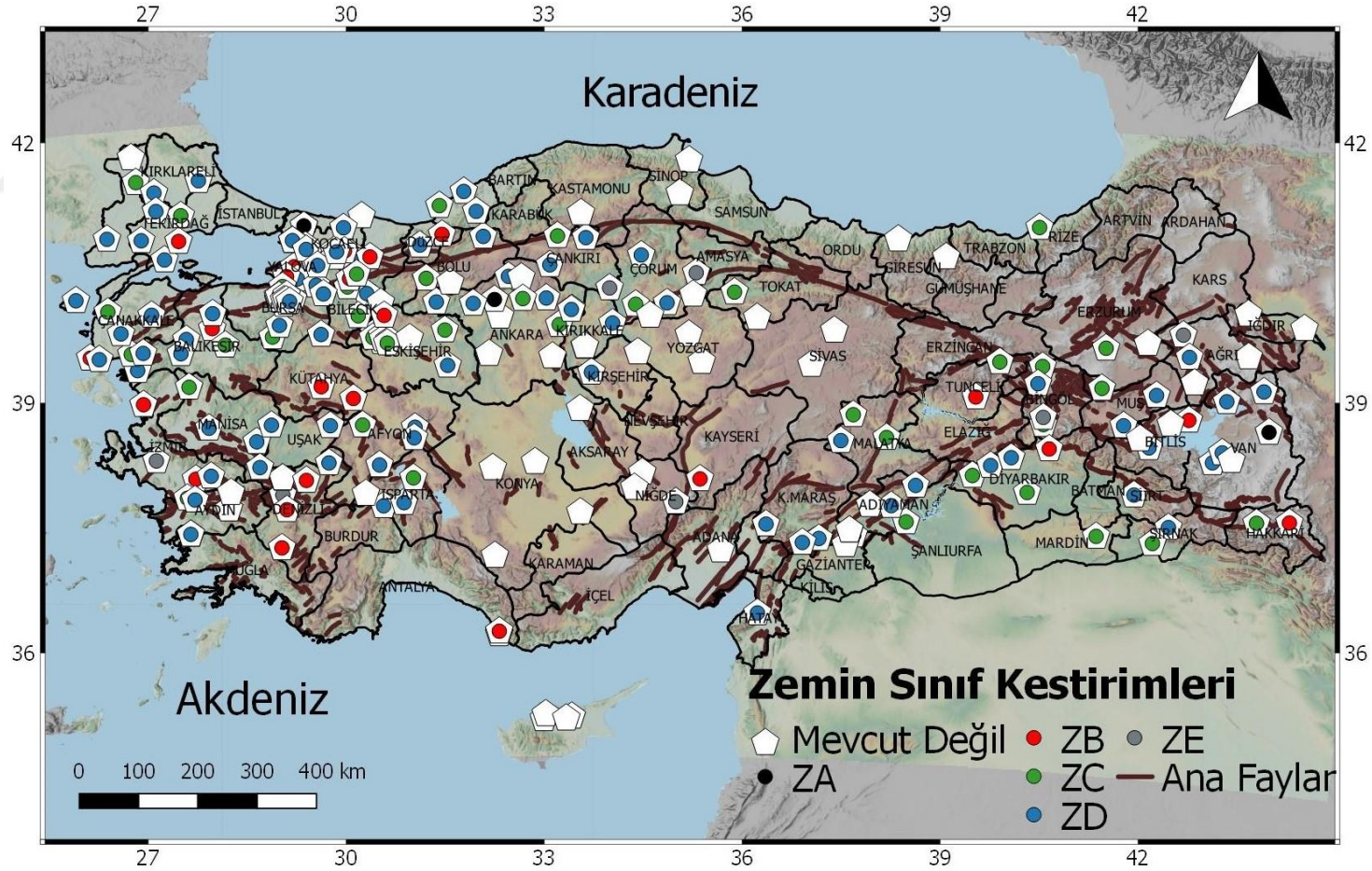
Her iki zemin sınıfı yaklaşımda da görüldüğü gibi ortalama spektral şekillere olan benzerlik ölçütü zemin sınıflarının kestiriminde önemli bir rol üstlenmektedir. Konvansiyonel yaklaşıma göre belirlenmiş istasyon yerel zemin sınıfları Şekil 5.15’de verilmişti. Bu zemin sınıflarını  $V_{S30}$ ’lara göre belirlenen spektral şekiller üzerinden kıyaslanarak kestirim başarıları araştırılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. TDBY 2018'e göre yerel zemin grupları bilenen istasyonlar ve önerilen yaklaşıma göre kestirilen grupların karşılaştırılması.

Zemin gruplarının kestirim başarısı, ZA sınıfında %75, ZB'de %68, ZC'de %67, ZD'de %74 ve ZE'de % 67 olarak hesap edilmiştir. Yerel zemin sınıfları bilinen beş yüz elli yedi (557) istasyon üzerinden yapılan bu değerlendirmede en başarılı kestirim ZD zemin grubunda görülmektedir. ZD grubuna ve diğer yerel zemin gruplarına ait karakteristik spektral şekillerin (Şekil 5.16) Spearman katsayısı ve periyot aralıklarına göre denetlenmesi sonucu elde edilen sonuçların başarı yüzdeleri tüm hesaplama, eleme kriterleri ve veri işlem süreçlerinin yerine getirilmesi ile sağlanmıştır. Gerçekleştirilen işlemlerin ve süreçlerin nihai emeli zemin sınıflarının hızlı, doğru ve masrafsız bir şekilde belirlemektir. Bu bağlamda yerel zemin sınıfı bilinmeyen ikiyüz otuz beş (235) istasyonun zemin sınıfı kestirilmiş ve istasyonlar grafiksel ve harita üzerinde sırasıyla Şekil 6.7 ve 6.8'de sergilenmiştir.

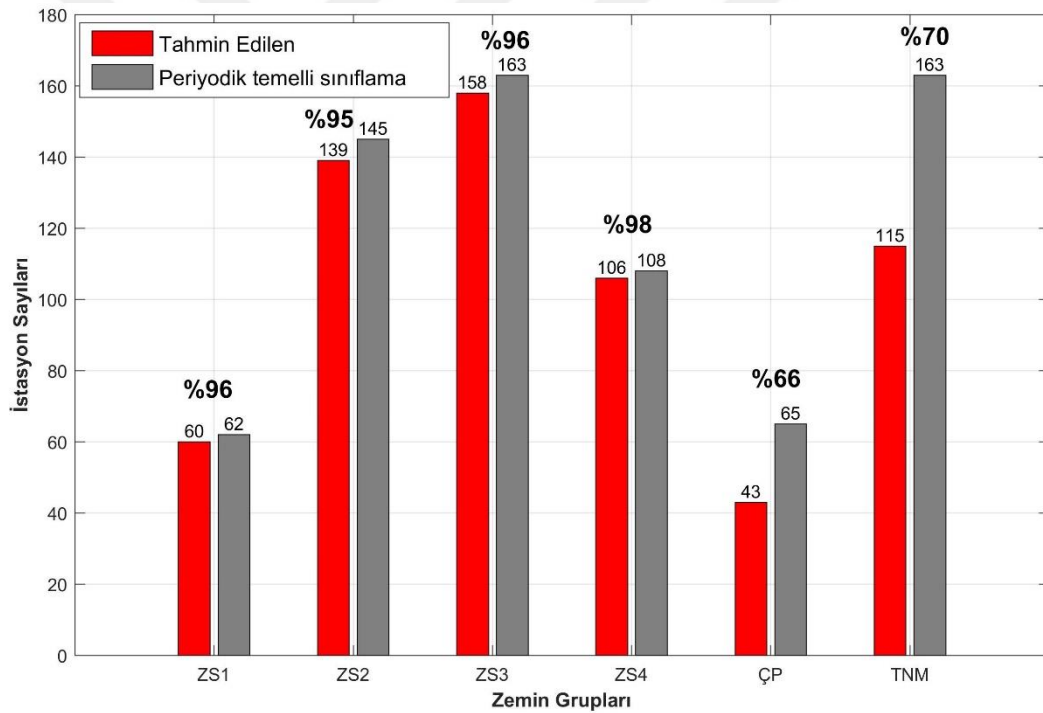




Şekil 6.8. Kestirilen ve kestirilemeyen zemin sınıflarına ait istasyonların harita üzerinde gösterimi

Kestirimler sonucu yüz yetmiş sekiz (178) zemin sınıfı belirlenmiştir. Elli (50) istasyon, kıstaslara uygun deprem kaydı olmaması ve yedi (7) istasyon da zemin sınıf kestirim algoritma şartlarını (Şekil 6.3) sağlamaması sonucu bu istasyonlara zemin sınıfı atanamamıştır. Şekil 6.8’de sergilenen haritada atanan zemin sınıfları bilinmeyen beyaz dolgulu kutucuklar üzerinde renklere göre tasniflenip çizdirilmiştir.

Zemin hakim periyodu temelli ortalama spektral şekillere göre sınıflanan ve kestirilen zemin gruplarında başarı oranı beklendiği gibi oldukça yüksek olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.9). Sınıflamada ilksel olarak esas alınan uluslararası periyot aralıkları ve sınıfları (Zhao ve diğ., 2006; Di Alessandro ve diğ., 2012) sonrasında belirlenen ortalama spektral şekiller ve onlara göre üretilen periyot aralıkları (Şekil 5.17 ve Tablo 5.2) periyot bazlı sınıflama önerisinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 6.9. Periyot bazlı zemin gruplarına ait istasyonlar kestirim başarılarının karşılaştırılması.

Kestirimlerde tanımlanamayan ve çoklu pik sergileyen spektral eğrilerde temel alınan gruptaki istasyon sayılarına göre bir düşüş görülmektedir. ZS1-ZS4 zemin sınıf grupları belirgin pikler sergilediği için başarı oranları sırasıyla %96, %95, %96 ve %98 olarak hesaplanmıştır. Çoklu pik ve tanımlanamayan sınıflardaki bu düşüşe bağlı

görece başarı diğer çalışmaların ne tür kıstaslar ve veri işlem süreçleri ile analiz edildikleri ile yakından ilişkilidir. Önerilen periyot bazlı sınıflamadaki çoklu pik ve tanımlamayan eğriler sergileyen istasyonların mümkün merteye az olmasını hedeflemektir. Söz konusu zemin sınıfları için tasarım spektrumlarında belirlenecek zemin etki katsayıları ve ivme azalım ilişkileri denklemlerindeki etkinlikleri ayrı bir çalışma ve karşılaştırma sahası olup, istasyona zemin sınıfı atanmasında kullanılan ters çözüm tabanlı algoritmalara dayanan  $V_{S30}$  kestirimlerinden daha pratik ve doğru sonuçlar üretebileceği düşünülmektedir. Çünkü zaten depremlere göre tasarlanan spektrumlar ve yer kestirim denklemleri (ivme-azalım ilişkileri) aynı zamanda depremlere göre belirlenen zemin sınıfları açısından tutarlılık ve güvenilirlik doğuracağı aşikârdır.

Bu bölüm ve alt başlıklarında istasyonlara ait zeminlerin nasıl sınıflandığı, konvansiyonel ve periyot bazlı sınıflamalara göre oluşturulan spektral şekillerin zemin sınıflamasındaki başarı yüzdeleri irdelendi. Bir sonraki bölüm olan sonuç ve önerilerde her bir istasyona ait detaylı sonuçlar tablolar halinde verilecek ve gelecek araştırmalara yenileme ve karşılaştırma bakımından ışık tutacak bir doküman olarak Ekler'de sunulan Matlab fonksiyon ve kodlarıyla birlikte kullanıcılara açık olacaktır.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi istasyonlarında kaydedilen deprem verilerinden hareketle elde edilen zemin baskın periyotları ve spektral şekillere dayalı sismik zemin sınıf belirlemesi düşüncesine dayanmaktadır. Öncelikle küresel ölçekte benzer sınıflamaları hangi ülke ağlarının kullandığına ve alternatif bir yaklaşım oluşturabilecek güçlü öngörüler (Zhao ve diğ., 2006; Di Alessandro ve diğ., 2012) belirlendikten sonra yöntem ve yaklaşımlar çeşitli sınamalardan geçirilerek uygulanabilirliği kararlaştırılmıştır. Bu amaçla istasyonların her birinde kaydedilen depremler uygun kriterler ve veri işlem aşamalarından geçirilerek tüm ulusal ağ için ortalama spektral şekiller üretilmiştir ve bu spektral şekillerden zemin baskın periyot aralıkları belirlenmiştir. Son olarak da ortalama spektral eğrilerin spektral büyütmelerini dikkate alan istatistiksel bir yaklaşıma dayalı zemin sınıflama indeksi oluşturulmuş yaklaşımın akış şeması da şekillendirilerek istasyonların zemin sınıfları tek tek belirlenmiştir.

İstasyonlarda kaydedilen deprem sayılarının ve ulaşılabilirliklerinin artmasıyla daha hızlı, etkin ve güvenilir sonuçların elde edilebilmesi kaçınılmaz bir süreç teşkil etmektedir. TR-KYH ağına ait tüm istasyonlardaki üç bileşen deprem kayıtlarına ait kesme dalga kısımları kullanılarak hesaplanan spektrumlar ve üretilen spektral şekiller ile ağa ait 701 istasyonun zemin sınıfı hem konvansiyonel şemaya ait hem de önerilen sınıflama şeması ile belirlenmiştir. Belirlenen sismik zemin sınıflarına ait başarı oranları her bir sınıf için değişmekte olup en düşük %68 en yüksek de %96 ile başarı yüzdeleri ile kestirilebilmektedir. Yerel zemin sınıfları bilinen beş yüz elli yedi (557) istasyon üzerinden yapılan değerlendirmede, ZA sınıfında %75, ZB’de %68, ZC’de %67, ZD’de %74 ve ZE’de % 67 başarı oranı hesap edilmiştir. Böylece yerel zemin sınıfı bilinmeyen ikiyüz otuz beş (235) istasyona ait zemin sınıfı kestirilmiştir. Zemin sınıf belirlemelerine ait yüz yetmiş sekiz (178) zemin sınıfı nihai olarak belirlenmiştir. Elli (50) istasyon, kıstaslara uygun deprem kaydı olmaması ve yedi (7) istasyon da zemin sınıf kestirim algoritma şartlarını sağlamaması sonucu bu istasyonlara zemin

sınıfı atanamamıştır. Zemin hakim periyodu temelli ortalama spektral şekillere göre sınıflanan ve kestirilen zemin gruplarında başarı oranı beklendiği gibi oldukça yüksek olarak hesaplanmıştır. Sismik zemin sınıf belirlemelerinde tanımlanamayan ve çoklu pik sergileyen spektral şekillerde temel alınan gruptaki istasyon sayılarına göre bir azalış görülmektedir. ZS1-ZS4 zemin sınıf grupları belirgin pikler sergilediği için başarı oranları sırasıyla %96, %95, %96 ve %98 olarak hesaplanmıştır. Önerilen periyot bazlı sınıflamadaki çoklu pik ve tanımlamayan eğriler sergileyen istasyonların mümkün mertebe az olmasını hedeflemektedir.

Kesme dalga trendinin belirlenmesinde önceki bölümlerde bahsedildiği gibi otomatik algoritmaların yetersizliği ve elle yapılan titiz tespitler sonucu hesaplanan on binlerce tepki ve Fourier spektrum oranlarının belirginliği, sinyal/gürültü oranı kalitesi ve üretilen spektral şekiller yadsınamaz şekilde güvenilir sonuçlar ortaya çıkmasını sağlamıştır. Tüm bu sonuçlar detaylı olarak Tablo D1’de oluşturulan tabloda sergilenmektedir.

Tüm çalışmanın bir nevi sonuç çizelgesini temsil eden Ek-D’de sergilene Tablo’nun paylaşımı araştırmacıların ilerleyen safhalarda bu konudaki çalışmalarına ait sonuçların karşılaştırılması ve geliştirilmesine ışık tutması ümit edilmektedir. Ayrıca sismik bölgelere ayırma çalışması ortalama spektral şekiller üzerinde ayırt edici bir farklılık oluşturmamıştır. Bu yüzden analizler tüm Türkiye ağını temsil eden periyot aralıkları ve spektral şekiller üzerinde yürütülmüştür. Bu kapsamda on binlerce depremden hesaplanarak üretilen ortalama spektral eğriler (şekiller) ‘den elde edilen baskın periyotlar büyütme ve eğrilerin eğilimleri, istasyon zeminlerinin sismik sınıflandırılmasında alternatif bir yöntem olarak önerilmektedir.

Sonuçlar üretilirken tepki spektrumlarının tercih edildiği görülmektedir. Fourier analizlerinin özünde yatan sinyali sinüzoidal ve periyodik (sabit örnekleme aralığı ile) bir yaklaşımla modellemek hakikaten yüksek ayrımlılığa sahip fakat aynı zamanda da yanıltıcı ve fazla pikler spektrumlar ortaya çıkarmaktadır. Bu spektrumlardan anlamlı sonuçlar üretmek için çeşitli yumuşatma işlemleri kullanmak gerekmektedir. Yumuşatma işlemleri deneysel çalışmalar ile belirlenip işleme sokulduğunda tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretebileceği aşikârdır. Bölüm 5.1’de de örnek analizlerle



sunulduğu gibi uygun yumuşatma fonksiyonu ile gerçekleştirilen özellikle orta-sıkı zeminlerde Fourier analizlerinin standart sapmaları tepki spektrum analizlerine göre nispeten daha düşüktür. Fakat çalışmada amaçlanan objektif, hızlı ve kullanıcıya yorum yapmasını gerektirmeyecek bir süreç hedeflenmiştir ve bu sübjektiflik (yumuşatma fonksiyonlarının ve onlara özgü parametrelerin seçimi) çalışmanın ruhuna ters düşeceği düşünülmüştür. Bu yüzden zemini % 5 sönümlü tek serbestlik dereceli bir sistem gibi varsayıp hareket denkleminin sayısal çözümü sonucu elde edilen ivme tepki spektrumlarından üretilen kararlı spektral şekiller ile daha tutarlı ve güvenilir sismik zemin sınıflarının belirlenebileceği kararlaştırılmıştır.

Türkiye özelinde, imara açılacak ve yapılaşmanın sağlanacağı kent ve köy yerleşik alanlarında zemin-etüt raporları ve jeolojik-jeoteknik raporlar kapsamında zemin sınıflamaları önemli yer tutmaktadır. Bu çalışmada önerilen periyot aralıkları ve zemin sınıflama yaklaşımı her ne kadar kuvvetli yer hareketi istasyonları için geliştirilmiş olsa da, kapsamı spesifik zemin sınıflama çalışmaları için de deprem yönetmeliği çerçevesinde geliştirilebilir.

Gelecek çalışmaların seyrine dair çalışmada sunulan yaklaşımın kısıtlamaları ve nasıl geliştirilebileceği üzerine önerilerin açıklanması faydalı olacaktır. Her ne kadar analiz edilen depremler belirli kıstaslarla elendikten sonra titiz bir veri işlem sürecinden geçirilip tutarlı ve güvenilir sonuçların elde edilmesi amaçlansa da, stokastik süreçlerin çıktıları olan deprem sinyallerinin kaotikliği kısıtlamalara sebep olabilmektedir. Örneğin geniş spektral bantlarda farklı frekans özellikleri ve istenilen zemin kaynaklı baskın periyotları elde edilmesi dikkatli ve adil filtreleme işlemleri gerektirmektedir. Özellikle depremlerin oluşturduğu durağan olmayan sinyallere ait sayısal filtreleme çalışmaları bilgisayar işlemci kapasiteleri arttıkça gelişmekte ve yeni çözümler üretmede sismoloji ve deprem mühendisliği disiplinlerine deprem risklerinin azaltılması yönünde yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada özellikle sinyal gürültü oranı yüksek olan yakın alan deprem kayıtlarına uygulanan Butterworth filtre ile HVSR eğrilerinden elde edilen baskın periyotlar ham kayıtlar üzerinden karşılaştırılarak tutarlı deneysel sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu durum uzak alan depremlerin ürettiği karakteristik baskın periyotlar üzerinden irdelendiğinde ise farklı

filtre bantlarının ve derecelerinin kullanılması gerekecektir. Uzak alan küçük ve orta büyüklüklere sahip depremler kullanıldığında gözlenen en önemli dezavantaj, düşük yer ivme değerlerinin kaydedilmesi ve bu durumun sinyal/gürültü oranlarında marjinal azalılar ortaya çıkardığıdır. Zemin sınıf kestirimlerinde, depremlerin uzak alan olarak nitelendirilen merkez üssünden 150 km'den fazla mesafelerde elde edilen kayıtlarına ait analizler depremin nispeten derin ( $>30$  km) ve düşük büyüklüklerde ( $3 < M_w < 5$ ) spektral şekiller üzerinde bozucu etkileri gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, derin ve uzak alan kaynaklı sinyallerin yol etkisi nedeniyle özellikle kesme dalgası fazlarında düşük periyotların soğrulmaya uğrayacağı ve bu yüzden sıkı olarak nitelenebilecek zeminlerde farklı sonuçlar üretebileceği için önerilen bu yaklaşımın yakın alan depremlerde daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Tabii ki veri kalitesi, deprem büyüklüğü ve derinliklerine bağlı olarak uzak alan depremlerle farklı yaklaşımlarla da zemin sınıf çalışmaları gerçekleştirilebilir.

HVSR eğrilerinden üretilen ortalama spektral şekillerin veri kaynağı bu çalışmada anlatıldığı gibi depremlerdi. Peki mobil gürültü ölçümleri ile istasyon bazlı olmayıp, imar çalışmalarında ve çevre şehircilik düzenlemeleri kapsamında gerçekleştirilen zemin-temel etüt ve jeolojik-jeoteknik raporlamalarda zemin sınıf belirlemeleri sismik gürültü ölçümleri ile gerçekleştirilebilir mi? Bu soru ihtiyaca binaen kolay uygulanabilirlik ve ekonomik açıdan masrafsız sonuçlar üretmek için piyasanın ihtiyacına yönelik cevaplandırılması gereken bir sorudur. Bu konuda yıllardan beri küresel ölçekte ciddi çalışmalar yapılmakta olup, uzun kayıtlarla ( $>30$  dak.) elde edilen sismik gürültü verilerinin analizi sonucu elde edilen zemin baskın periyotları ümit verici ve güvenilir sonuçlar üretmektedir. Fakat zemin transfer fonksiyonu yani HVNR eğrilerinin maksimum genliği zemin büyütmesi hakkında hatalı sonuçlar üretebilmektedir. Bu sorun, HVNR eğrilerinin karakteristik spektral şekilleri üzerinden yapılacak bir çalışma ile önerilen yöntemle üstesinden gelinebilir ve başarılı sonuçlar üretmesi hiç şaşırtıcı olmaz. İlerleyen çalışmalarda bu mesele üzerinde durulması ile önerilen yöntemin geliştirilmesi ve veri çeşitlendirilmesi yapılarak verimli, güvenilir ve ekonomik çıktılar sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

Agrawal, P., ve Shrikhande, M., *Earthquake resistant design of structures*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2006

Allen, R. V., Automatic earthquake recognition and timing from single traces, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1978, **68**(5), 1521–1532.

Allen, R. V., Automatic phase pickers, Their present use and future prospects, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1982, **72**(6B), 225–242.

Afet ve Acil Durum Başkanlığı, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Ankara, 2018.

Aki, K., Local site effects on strong ground motion, *Proceedings of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, 1988.

Aki, K., Richards, P.G.,. *Quantitative Seismology*, second ed. University Science Books, Sausalito, CA, 700, 2002.

Ambraseys, N.N., K.a. Simpson ve J.J. Bommer, Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, **25**(2), 371-400.

Askan, A., Sisman, F. N., ve Ugurhan, B., Stochastic strong ground motion simulations in sparsely-monitored regions: A validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **55**(4), 170-181.

Asten, M. W., Askan, A., Ekinçioğlu, E. E., Sisman, F. N., ve Ugurhan, B., Site characterisation in north-western Turkey based on SPAC and HVSR analysis of microtremor noise, *Exploration Geophysics*, 2014, **45**(2), 74-85.

Association Francaise Du Genie Parasismique AFPS, Recommendations AFPS-90 pour la redaction des regles relatives aux ouvrages et installations a realiser dans les regions sujettes aux seismes, *Presse des Ponts et Chaussées*, Paris/France, 1990.

Athanasopoulos, G.A., P.C. Pelekis ve E.A.Leonidou, Effects of surface topography and soil conditions on the seismic ground response - including liquefaction in the Egeon (Greece) 15/6/1995 earthquake. *Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering* (11th ECEE), Paris,France, 1998.

Baer, M., and U. Kradolfer, An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1987,**77**(4), 1437–1445.

Bakır, B. S., Yılmaz M. T., Yakut, A., and Gülkan, P., Reexamination of damage distribution in Adapazarı: Geotechnical considerations, *Engineering Structures*, 2005 **27**(7),1002-1013.

Bard, P. Y., Duval, A. M., Lebrun, B., Lachet, C., Riepl, J., ve Hatzfeld, D., Reliability of the H/V technique for site effects measurement: An experimental assessment. *Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1997, Istanbul, July,19-24.

Bard, P. Y., Bora, S. S., Hollender, F., Laurendeau, A., ve Traversa, P, Are the standard VS-Kappa host-to-target adjustments the only way to get consistent hard-rock ground motion prediction?. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 1-20.

Beresnev, Igor A., and Kuo-Liang Wen. "Nonlinear soil response—A reality?." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, **86**(6), 1964-1978.

Blandford, R. R., Seismic event discrimination, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1982, **72** (7), 69–87.

Bray, J.d. ve A. Rodríguez-Marek, Geotechnical site categories. *Proceedings of the First PEERPG ve E-Workshop on Seismic Reliability of Utility Lifelines*, San Francisco, CA, 1997.

Boore DM., A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1972, **62**(1),275–284

Boore, D. M., Can site response be predicted?, *Journal of earthquake Engineering*, 2004, **8**(1), 1-41.

Bora, S. S., Scherbaum, F., Kuehn, N., Stafford, P., On the relationship between Fourier and response spectra: Implications for the adjustment of empirical ground-motion prediction equations (GMPEs), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, **106**(3), 1235-1253.

Butterworth, Stephen, Experimental wireless and the wireless engineer, *Wireless Eng* 7, 1930, 536.

Carcione, J. M., *Handbook of geophysical exploration*, Seismic exploration, 2001, 0950-1401.

Castellaro, S., Mulargia, F., Rossi, P. L., VS30, Proxy for seismic amplification?. *Seismological Research Letters*, 2008, **79**(4), 540-543.

Chávez-garcía, F.J. ve J. Cuenca, Site effects and microzonation in Acapulco, *Earthquake Spectra*, 1998, **14**(1), 75-93.

Cheng, T., Cox, B. R., Vantassel, J. P., ve Manuel, L., A statistical approach to account for azimuthal variability in single-station HVSR measurements, *Geophysical Journal International*, 2020, **223**(2), 1040-1053.

- Cooley, J. W., Tukey, J. W., An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of computation*, 1965, **19**(90), 297-301.
- Cox, B. R., Cheng, T., Vantassel, J. P., ve Manuel, L., A statistical representation and frequency-domain window-rejection algorithm for single-station HVSR measurements, *Geophysical Journal International*, 2020, **221**(3), 2170-2183.
- Datta, T. K., *Seismic analysis of structures*, 2010, John Wiley & Sons.
- Deutsches Institut für Normung Din, *DIN 4149*, Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Berlin, 2002.
- Earle, P., and P. Shearer, Characterization of global seismograms using an automatic picking algorithm, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, **84**(2), 366–376.
- Edwards, B., Michel, C., Poggi, V., ve Fäh, D., Determination of site amplification from regional seismicity: Application to the Swiss National Seismic Networks. *Seismological Research Letters*, 2013, **84**(4), 611-621.
- Ende, C., Development of a program for ground response analysis with respect to SASW and the Nakamura method, *Project work 00:1, Division of Soil and Rock Mechanics, Dept. of Civil and Environmental Eng.*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- Elton D.J. ve J.R. Martin II, Dynamic site periods in Charleston, SC, *Earthquake Spectra*, 1989, **5**(4), 703-734.
- European Committee for Standardization CEN (2004), *Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance – Part I: General Rules, seismic actions and rules for buildings*, (EN-1998-1). Brussels, 2004.
- García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F. J., Luzón, F., ve Perton, M., A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption. *Computers & Geosciences*, 2016, **97** (1), 67-78.
- Geomatrix consultants, *Compilation of geotechnical data for strong-motion stations in the western United States*, Report to Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, Project No. 2256.
- Gulkan P. and Kalkan E.,. Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey. *J. Seismol.*, 2002, **6**(3), 397–409.
- Fäh, D., F. Kind ve D. Giardını (): A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.*, 2001, **145**(2), 513-536.
- Field, Edward H., and Klaus H. Jacob., A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bulletin of the seismological society of America*, **85**(4), 1127-1143.

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B., Sands M., *The Feynman lectures on physics, Vol. I*, The new millennium edition: mainly mechanics, radiation, and heat, Basic books, 2011.

Frigo, M., Johnson, S. G. FFTW, An adaptive software architecture for the FFT. In Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference*, Vol. 3,1381-1384.

Fukushima, Y., Bonilla, L. F., Scotti, O., ve Douglas, J. (), Site classification using horizontal-to-vertical response spectral ratios and its impact when deriving empirical ground-motion prediction equations, *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, **11**(5), 712-724.

Geli L, Bard P-Y, Jullien B., The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results, *Bull Seismol Soc Am.*, 1988, **78**(1),42–63

Good, I. J. (). The interaction algorithm and practical Fourier analysis, *Journal of the Royal Statistical Society*, 1958, Series B (Methodological), 361-372.

Hampe, E., C. Riedel ve J. Schwarz, Ergebnisse von Experimenten und Berechnungen zur Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, Teil 1, 1990, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Juli.

Harris F. J., On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, *Proceedings of the IEEE*, 1978, **66**(1), 51-83.

Herak, M.,. Ovisnost parametara potresa o geotehničkim svojstvima površinskih slojeva tlai, Dependence of earthquake parameters on geotechnical properties of surface layers of the soil, *Unpublished M.Sc., Thesis*, University of Zagreb, Zagreb, 1985, 117pp. (Sırpça).

Herak, M., ModelHVSR—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise, *Computers & Geosciences*, 2008, **34**(11), 1514-1526.

Hobiger, M., Bard, P. Y., Cornou, C., & Le Bihan, N., Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec), *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(14).

Holstein, Edward D., PEH., *Fundamentals of Geophysics*, Society of Petroleum Engineers, Houston, 2007.

Hosser, D. & K. Klein, Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke mit erhöhtem Sekundärrisiko, *Technical report*, Könnig & Heunisch, Frankfurt/M., 1983.

Hudson JA, Knopoff L, Statistical properties of Rayleigh waves due to scattering by topography, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1967, **57**(1),83–90.

QGIS Development Team, *QGIS Geographic Information System*, 2009, Open Source Geospatial Foundation.

International Conference Of Building Officials Icbo, *1997 Uniform Building Code (1997-UBC)*, Whittier/CA, United States of America, 492, 1997.

Ibs-von Seht, M., ve Wohlenberg, J., Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, **89** (1), 250-259.

Kalkan, E., An automatic P-phase arrival-time picker, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, **106**(3), 971-986.

Kamalian M, Jafari MK, Sohrabi-Bidar A, Razmkhah A., Seismic response of 2-D semi-sine shaped hills to vertically propagating incident waves: amplification patterns and engineering applications, *Earthq Spectra*, 2008, **24**(2), 405–430

Kramer, S.L., Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, *Civil engineering and engineering mechanics series*, New Jersey, 1996.

Kuramoto, H., Seismic design codes for buildings in Japan. *Journal of Disaster Research*, 2006 **1**(3), 341-356.

Konno, K., Ohmachi, T., Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, **88**(1), 228-241.

Lachet, C., M. Bouchon, N. Theodulidis ve P.-Y. Bard, Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions. In: G. DUMA (ed.), *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria. Balkema Rotterdam, 1995.

Lang, D. H., Damage potential of seismic ground motion considering local site effects, *Doktora Tezi*, Bauhaus-Universität Weimar, Almanya, 2004

Lang, D.H., J. Schwarz ve C. Ende, Subsoil classification of strong-motion recording sites in Turkish earthquake regions, *Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar*, 2003, 116.

Langston, A., Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977 **67**(3),713-724.

Lee, C., Cheng, C., Liao C., ve Tsait Y., Tsai, Site classification of Taiwan free-field strongmotion stations, *Bulletin of the Seismological Society of America*,2001, **91**(5), 1283-1297.

Lee, C, C., Liou ve Wu, B., Microtremor measurements within the Taipei Basin. In: K. ISHIHARA (ed.), *Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-Tokyo 1995, Balkema Rotterdam, Vol. 1, 567-572.

Lee, V. W., Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., ve Novikova, E. I., Empirical equation describing attenuation of the peaks of strong motion in terms of magnitude, distance, path effects and site conditions, University of Southern California, Department of Civil Engineering, Los Angeles, 1995, CA., *Report CE*, 95-02.

Livaoğlu, H., Sertçelik, F., A Practical Solution For Detecting The Bedrock Depth Beneath The Strong Ground Motion's Stations: A Case Study For Kocaeli Province (Turkey), *9th Congress of the Balkan Geophysical Society. European Association of Geoscientists & Engineers*, 2017,1-5.

Livaoğlu H., ve Şentürk E., A Matlab based function: Frequency domain Konno-Ohmachi smoothing function for ground motion spectra, Basılmamış, 2018, (<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11204.12168>)

Livaoğlu, H. ve Sertçelik, F., Comparison of Response and Fourier Spectral Ratios In Evaluating The Site Predominant Periods, 2019, *VI. International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Turkey, 800-804.

Livaoğlu, H., Irmak, T. S., ve Güven, I. T., Seismic vulnerability indices of ground for Değirmendere (Kocaeli Province, Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**(1), 507-517.

Livaoğlu, H., ve Irmak, T. S., An empirical relationship between seismic bedrock depth and fundamental frequency for Değirmendere (Kocaeli-Turkey), *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(20), 681.

Livaoğlu H., Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Esas Elastik Tasarım İvme Spektrumları, *Elastic Design Spectra as regards to Turkish Earthquake-Building Regulation Code*, Basılmamış, 2020, (DOI: 10.13140/RG.2.2.26013.13280).

Livaoğlu, H., Şentürk E., Sertçelik F., A Comparative Study of Response and Fourier Spectral Ratios on Classifying Sites, *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 1-15.

Matlab, version 8.6.0 (R2015b), *The MathWorks Inc.*, Natick, Massachusetts, 2015.

Mayer, R., ve Jiménez , M., Seismic Zoning. State of the art and recommendations for Switzerland, 2000, *Geologische Berichte Landeshydrologie und geologie*, 26, Bern.

Molina, S., Lang, D. H., Singh, Y., ve Meslem, A., A period-dependent topographic amplification model for earthquake loss estimation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, **17**(7), 3709-3725.

Molnar, S., Assaf, J., Sirohey, A., and Adhikari, S. R., Overview of local site effects and seismic microzonation mapping in Metropolitan Vancouver, British Columbia, Canada, *Engineering Geology*, 2020,105568.

Nakamura Y., A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Q. Rep. RTRI.*, 1989, **30**(1), 25–33.



Nath, S. K., Sengupta, P., Srivastav, S. K., Bhattacharya, S. N., Dattatrayam, R. S., Prakash, R., ve Gupta, H. V., Estimation of S-wave site response in and around Delhi region from weak motion data, *Journal of Earth System Science*, 2003, **112**(3), 441-462.

Nogoshi M, Igarashi T., On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *J Seismol. Soc. Jpn.*, 1971, **24**(1), 26–40.

Novikova, Elena I., and M. D. Trifunac, Influence of the Geometry of Sedimentary Basins On the Frequency Dependent Duration of Strong Earthquake Ground Motion, *Chinese Science Abstracts Series*, 1995, **14**(5), 55-56.

Özel, O., E. Cranswick, M. Meremonte, M. Erdik ve E. Safak, Site effects in Avcilar, west of Istanbul, Turkey, from strong- and weak-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, **92**(1), 499-508.

Özel N., Sasatani T. and Özel O., A study of strong ground motions during the largest aftershock (Mw = 5.8) of the 1999 Kocaeli Turkey Earthquake, *Tectonophysics*, 2004, **391**(1), 347–355.

Pagliaroli A, Avalle A, Falcucci E, Gori S, Galadini F., Numerical and experimental evaluation of site effects at ridges characterized by complex geological setting, *Bull. Earthq. Eng.*, 2015, **13**(10), 2841–2865.

Paolucci R., Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities, 2002, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* **31**(1), 1831–1853.

Piña-Flores, J., Pertou, M., García-Jerez, A., Carmona, E., Luzón, F., Molina-Villegas, J. C., & Sánchez-Sesma, F. J., The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA), 2016, *Geophysical Journal International*, 416.

Rathje, E.M., K.H. Stokoe II ve B. Rosenblad, Strong motion station characterization and site effects during the 1999 earthquakes in Turkey, 2003, *Earthquake Spectra*, **19**(3), 653-675.

Rastin, S. J., C. P. Unsworth, R. Benites, and K. R. Gledhill, Using real and synthetic waveforms of the Matata swarm to assess the performance of New Zealand GeoNet phase pickers, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2013, **103**(1), 2173–2187.

Raptakis, D., N. Theodulidis ve K. Pitilakis, Data analysis of the Euroseistest strong motion array in Volvi (Greece), Standard and horizontal-to-vertical spectral ratio techniques, *Earthquake Spectra*, 1998, **14**(1), 203-223.

Rodríguez-Marek, A., J.D. Bray ve N.A. Abrahamson, An empirical geotechnical seismic site response procedure, 2001, *Earthquake Spectra*, **17**(1), 65-87.

Rong, M., Wang, Z., Woolery, E. W., Lyu, Y., Li, X., ve Li, S., Nonlinear site response from the strong ground-motion recordings in western China, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 82, 99-110.

Ruud, B. O., and E. S. Husebye, A new three-component detector and automatic single-station bulletin production, 1992, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**(1), 221–237.

Sandikkaya, M. A., Yılmaz, M. T., Bakır, B. S., ve Yılmaz, Ö., Site classification of Turkish national strong-motion stations. *Journal of Seismology*, 2010, **14**(3), 543-563.

Satoh, T., H. Kawase ve S. Matsushima., Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves and codas, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, **91**(2), 313-334.

Scawthorn, C., ve Chen, W. F. (Eds.), *Earthquake engineering handbook*, 1. Baskı, CRC press, New York, 2002.

Schwarz, J., D.H. Lang ve CH. Golbs, Erarbeitung von Spektren für die DIN 4149-neu unter Berücksichtigung der Besonderheiten deutscher Erdbebengebiete und der Periodenlage von Mauerwerksbauten, *Forschungsbericht im Auftrage der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerksbau*, e.V., Erdbebenzentrum am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar, Juli 1999 (1. Entwurf), September 1999 (Endfassung).

Sedaghati, F., Rahpeyma, S., Ansari, A., Pezeshk, S., Zare, M., ve Daneshvaran, S., A study of horizontal-to-vertical component spectral ratio as a proxy for site classification in central Asia, *Geophysical Journal International*, 2020, **223**(2), 1355-1377.

Setiawan, B., Jaksa, M., Griffith, M., ve Love, D., Estimating bedrock depth in the case of regolith sites using ambient noise analysis, *Engineering Geology*, 2018, **243** (1), 145-159.

Seed, H.B., C. Ugas ve J. Lysmer, Site-dependent spectra for earthquake-resistant design, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66, 1976, 221-243.

Solomon, O. M., D. R. Larson, and N. G. Paulter, Comparison of some algorithms to estimate the low and high state level of pulses, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 1, Budapest, Hungary, 21–23 May 2001, 96–101.

Su, Feng; Anderson, John G.; Zeng, Yuehua, Study of weak and strong ground motion including nonlinearity from the Northridge, California, earthquake sequence, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, **88**(6), 1411-1425.

Taber, J.J., Comparison of site response determination techniques in the Wellington region, 2000, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland/New Zealand.

Tarvainen, M., Automatic seismogram analysis: Statistical phase picking and locating methods using one-station three-component data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1992, 860–869.

Theodulidis, N.P. ve P.-Y. Bard, Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1995, **14** (1), 177-197.

Thompson, E. M., Baise, L. G., Tanaka, Y., ve Kayen, R. E., A taxonomy of site response complexity, 2012, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **41**(2), 32-43.

Tsai, N. C., Influence of local geology on earthquake ground motion, Ph.D. Thesis, 1969, California Institute of Technology, Pasadena

Tsai, N.C., A note on the steady-state response of an elastic half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1970, **60**, 795–808.

Tsai, N.C., Housner, G.W., Calculation of surface motions of a layered half-space, 1970, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **60**, 1625–1651.

Tsuboi, S., M. Saito ve Y. Ishihara, Verification of horizontal-to-vertical spectral-ratio technique for estimation of site response using borehole seismographs, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, **91** (3), 499-510.

Ulusay, R., ve Sönmez, H. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, 2007, JMO, İstanbul.

Ulutaş, E., Doğu Marmara Sismik Bölgeleme, Kocaeli İl Sınırları ve İzmit Yerleşim Alanının Sismik Mikrobölgelemesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 168635.

Ulutaş, E., Coruk, Ö., ve Karakaş, A., A study of residuals for strong ground motions in Adapazari basin, NW Turkey, by Ground Motion Prediction Equations (GMPEs). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2011, **55**(2), 213-240.

Ulutaş, E. ve Özer, Mithat F., Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for eastern Marmara region in Turkey, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2010, **35**(1), 187.

URL-1:<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/74084-ground-shaking-duration>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 9, 2020. (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2020)

URL-2: <https://www.guralp.com/documents/MAN-050-0005.pdf>, (Ziyaret tarihi: 27 Temmuz 2016).

URL-3: An Automated S-phase Arrival Time Picker with SNR Output (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70343-an-automated-s-phase-arrival-time-picker-with-snr-output>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved December 4, 2020. (Ziyaret tarihi: 31 Kasım 2019).

Van Der Baan, M., The origin of SH-wave resonance frequencies in sedimentary layers, 2009, *Geophysical Journal International*, **178**(3), 1587-1596.

Zaslavsky, Y., A. Şapıra ve A.A. Arzı, Site response study in the Dead Sea area using earthquake and microtremors data, *Proceedings of the 26th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC)*, 1998, 258-262, Tel Aviv/Israel.

Zaslavsky, Y. ve A. Şapıra, The influence of topographical effects on seismic ground motion, *Proceedings of the 26th General Assembly of the European Seismological Commission (ESC)*, 1998, 241-245, Tel Aviv/Israel.

Zola, M., The relationship between shock response spectrum and fast Fourier transform, 2001, *Report*, INIS-XA--584.

Wang, L. J., Processing of near-field earthquake accelerograms. 1996, California.

Wathelet M., Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion, Doktora tezi, Universit'e de Li'ege, Facult'edesSciences Appliqu'ees, Belçika, 2008.

Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., ve Trujillo, J., A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, **88**(1), 95-106.

Wolfrom S., *The Mathematica Book*, Champaign,IL: Wolfrom Media, 1999, Cambridge University Press.



## EK-A

AFAD-TRKYH veritabanından indirilen verilerin seçimi, işlenmesi, tepki ve Fourier spektrum oranlarının hesaplanmasını ve sonuçların yazdırılıp kaydedilmesini sağlayan ana program;

```
% ydd(t)+2*xi*w*yd(t)+w^2*y(t)=-f(t) %dif har.denklemi
% zaman ortamı çözümü (duhemal's integral veya konvolisyon);
%tek serbetlik dereceli H/V elastik tepki spektrumu
%sıfır başlangıç koşulları kullanıldı
%dosya içindeki verileri okuyarak S dalgası kısmını kullanıcı
seçer
%filtreler trend giderir ve pseudo spektral ivmelerin ortalama hv
%lerini çizdirir % gacc=gacc/981; %gal to g
%2008 den önceki kayıtlara filtre uygulama!!
%revised by hamdullah&erman 08.03.2018
%E-mail: hливаoglu@gmail.com
%S/N ve haversine uzaklık (istasyon-episantr) eklendi
%figure ve sonuçların yazılması eklendi

clc;clear;close all;

stationcode = '7001';
filefolder = fullfile('D:\RHV_yeni\getdata', stationcode);
% filefolder = fullfile(stationcode);
myfiles = dir(fullfile(filefolder, '*.txt'));

for i = 1 : length(myfiles)
[data,headers] =
readaccfile(fullfile(filefolder,myfiles(i).name), 'SAMPLING
INTERVAL (sec),EARTHQUAKE MAGNITUDE,STATION COORDINATES,EPICENTER
COORDINATES,EARTHQUAKE DEPTH (km),RAW PGA VALUES (gal),STATION ID
');
dt = str2num(headers{1});
magnitude{i} = headers{2};
kos{i} = headers{3};
kod{i} = headers{4};
depth=str2num(headers{5});
pga=headers{6};
pgaparameter = regexp(pga , ' ', 'split');
pga = str2num(pgaparameter{3});
ID{i}=headers{7};
ID{i}=ID{i}(2:5);
mag=headers{2};
mw=regexp(mag , ' ', 'split');
fs=1./dt; %örnekleme frekansı
fn=0.5/(dt);%nyquist
N=length(data);
T=dt*(N-1);
time=0:dt:T;
```

Şekil A.1. Ana program

```

% Coğrafi koordinat (N-S)
% Radial-Tangential

%%
%istasyona olan uzaklık
e1, pos] = textscan(kos{i}, '%8c', 1);
e1=str2double(e1);
b1= textscan(kos{i}(pos+3:end-2), '%s');
b1=str2double(b1{1});
[e2, pos1] = textscan(kod{i}, '%8c', 1);
e2=str2double(e2);
b2= textscan(kod{i}(pos+3:end-2), '%s');
b2=str2double(b2{1});

R= haversine([e1 b1], [e2 b2]);
% dr=pi/180;
% az=atan2(cos(e1*dr)*cos(e2*dr)*sin((b1*dr)-(b2*dr)), sin(e1*dr) -
(cos(R/111.95))*(sin(e2*dr)))

%azimut hesabı
% az=atan2(cos(e1)*cos(e2)*sin((b1)-(b2)), sin(e1) -
(cos(R/111.95))*(sin(e2)));
% az=rad2deg(az);
% if az<0
%     az=az+360;
% else
%     az=az;
% end

% az=azimuth(e2,b2,e1,b1);

if isequal(depth, [])
    depth=40;
end
if R<=150 && depth<=30 && pga >= 0.3 && pga <= 100
%   if R<=150
% if R<=150 && depth<=30 && pga >= 5 && pga <=100 %lineer kayıt
eşikleri
% (ji'ye göre)
%   if R<=150
% if R<=150 && depth<=30 && pga >= 0.2 && isequal(mw{3}(1:2)
, 'Mw')
%   if isequal(mw{2}(1:5), '3.5Md')
%       continue;
%   end
% if R<=150 && depth<=30 && pga >= 0.3 && pga <=100 &&
isequal(mw{3}(1:2), 'Mw') %çok artçı kayıtlar için kullan %|
isequal(mw{2}(1:3), '3.5Md')
% NFFT=2^nextpow2(N);
% fn=0.5/(dt);
% df=2*fn/(NFFT);
% frek=0.01:df:2*fn-df;

```

Şekil A.1. (Devam)

```

% fssPeriod=1./frek;
% data(:)=remove_trend(data(:));
% data(:)=data(:)-mean(data(:));

% filtre
f1=1;
f2=15;
% kritik frekansların normalizesi
% w1=2*fs*tand((2*pi*f1)/(2*fs));
% % w2=2*fs*tand((2*pi*f2)/(2*fs));
w1=f1/fn;
w2=f2/fn;
wn=[w1 w2]; %for bandpass
% wn1=[w2]; %for highpass
% Wn=0.5/fn;
%%
% pencere&yuvarlatma&filtre high&bandpass&lowpass
% cf=0.5; %cut off freqeuncy for highpass&lowpass
% Wn = 2*fs*tand((2*pi*cf)/(2*fs));% Normalized cutoff frequency

% w=hamming(N,'periodic');
% w=repmat(w,1,3);
% data=data.*w;

% w=hann(N,'periodic');
% w=repmat(w,1,3);
% data=data.*w;

% w = gausswin(N,2.5);
% w=repmat(w,1,3);
% data=data.*w;

% w=blackman(N,'periodic');
% w=repmat(w,1,3);
% data=data.*w;

% w = kaiser(N);
% w=repmat(w,1,3);
% data=data.*w;

n=6; % butterworth filtre için derece
% [b,a] = butter(n,wn1,'high'); % filter
[b,a] = butter(n,wn,'bandpass');
data=filter(b,a,data);

gaccy=data(:,1); %n
gaccy1=data(:,2); %e
gaccy2=data(:,3); %z
rotate radyal-tanjansiyel
% [gaccyr,gaccylr]=rotatert(gaccy,gaccy1,az);
% [gaccy,gaccy1]=rotatert(gaccy,gaccy1,az);

```

Şekil A.1. (Devam)



```

tx=5;
tx1=max(time)/2;
ty=max(gaccy)/1.2;
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])

plot(time,gaccy1);ylabel('E-W(Gal)');hold on
text(tx,ty,magnitude(i),'FontSize',10);
text(tx1,ty,ID(i),'FontSize',10);
%%
ss=ginput(2);
hold off;close
if ~isempty(ss)
gacc1=gaccy(round(ss(1)/dt):round(ss(2)/dt));
%%
n1=length(gaccy(1:round(ss(1)/dt)));
n11=length(gacc1);
np1=gaccy(1:round(ss(1)/dt));
signal1=fft(gacc1,n11);
signal1 = (2*abs(signal1(1:round(n11/2+1))))).^2;

noise1=fft(np1,n1);
noise1 = (2*abs(noise1(1:round(n1/2+1))))).^2;
snr1=rms(signal1)/rms(noise1);
%%
gacc2=gaccy1(round(ss(1)/dt):round(ss(2)/dt));
%%
n2=length(gaccy1(1:round(ss(1)/dt)));
n22=length(gacc2);
np2=gaccy1(1:round(ss(1)/dt));
signal2=fft(gacc2,n22);
signal2 = (2*abs(signal2(1:round(n22/2+1))))).^2;
noise2=fft(np2,n2);
noise2 = (2*abs(noise2(1:round(n2/2+1))))).^2;
snr2=rms(signal2)/rms(noise2);
%%
gacc3=gaccy2(round(ss(1)/dt):round(ss(2)/dt));
%%
n3=length(gaccy2(1:round(ss(1)/dt)));
n33=length(gacc3);
np3=gaccy2(1:round(ss(1)/dt));
signal3=fft(gacc3,n33);
signal3 = (2*abs(signal3(1:round(n33/2+1))))).^2;
noise3=fft(np3,n3);
noise3 = (2*abs(noise3(1:round(n3/2+1))))).^2;
snr3=rms(signal3)/rms(noise3);
snr=geomean([snr1,snr2,snr3]);
if snr>2
%%
xi = 0.05;
TnInitial = 0.05 ;
TnFinal = 2 ;
stepTn = 0.0025 ; %0.0025

```

Şekil A.1. (Devam)

```

sPeriod = TnInitial:stepTn:TnFinal ;
[PSA] = responseSpectrahl(xi, sPeriod, gacc1, dt);
[PSA1] = responseSpectrahl(xi, sPeriod, gacc2, dt);
[PSA2] = responseSpectrahl(xi, sPeriod, gacc3, dt);
psaoy=sqrt((PSA.^2+PSA1.^2)./2);
hv{i}=psaoy./PSA2;
indis(i)=find(hv{i}==max(hv{i})); %maks hv değerinin olduğu yer
t0(i)=sPeriod(indis(i));%maks değerin oldu periyot
else

    fprintf('SNR(%d) = %5.2f\n',i, snr)
end
clearvars data
end
end
end
ind = ~cellfun('isempty',hv);
hv = hv(~cellfun('isempty',hv));

hold on
for j = 1 : length(hv)
    plot(sPeriod,hv{j});
end

s=figure (1);
plot(sPeriod,geomean(vertcat(hv{:}))+2*std(vertcat(hv{:})), 'r--',
'LineWidth',1)
plot(sPeriod,geomean(vertcat(hv{:})), 'k-', 'LineWidth',2)
plot(sPeriod,geomean(vertcat(hv{:}))-2*std(vertcat(hv{:})), 'r--',
'LineWidth',1)
legend(magnitude{ind}, 'Std(%95)', 'Mean RHV')
xlabel('Predominant Periods (s)', 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Response Spectral Ratios (RHV)', 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'XScale', 'log');
set(gca, 'XLim', [0.05 2]);
set(gca, 'XTick', [0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1.5 2]);

%%ortlama hakim periyot ve max hv
indis1=find(geomean(vertcat(hv{:})) ==
max(geomean(vertcat(hv{:})))));
A0= max(geomean(vertcat(hv{:})));
% ii=i(~( isinf(i) | isnan(i) | i == 0 ));
T0=sPeriod(indis1);

t0 = t0(~( isinf(t0) | isnan(t0) | t0 == 0 ));
t0_mean = median(t0);
% t0_std = std(t0);

% t0_std1=harmmean(t0);
t0_std = 0.2
t0_std1=0.2

```

Şekil A.1. (Devam)

```

if A0>2
if t0_std>t0_std1
yLimits = get(gca,'YLim');
line([T0 T0],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',4,'Color','Black','LineStyle','-.')
line([T0-t0_std1 T0-t0_std1],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')
line([T0+t0_std1 T0+t0_std1],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')
line([T0-t0_std1 T0+t0_std1],[A0
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')
h = area([T0-t0_std1,T0+t0_std1],[A0,A0],yLimits(1));
h.FaceColor = [0.5 0.5 0.5];
h.FaceAlpha = 0.3;

else

    yLimits = get(gca,'YLim');
line([T0 T0],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',4,'Color','Black','LineStyle','-.')

line([T0-t0_std T0-t0_std],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')
line([T0+t0_std T0+t0_std],[yLimits(1)
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')
line([T0-t0_std T0+t0_std],[A0
A0],'LineWidth',2,'Color','Red','LineStyle','-.')

h = area([T0-t0_std,T0+t0_std],[A0,A0],yLimits(1));
h.FaceColor = [0.5 0.5 0.5];
h.FaceAlpha = 0.3;
end
end
hold off
folder1='D:\RHV_yeni\HVSRSONUÇLAR\rhvtxt2';
dosyaismi=[stationcode,'_rhv','.txt'];
filename = fullfile(folder1, dosyaismi);
fileID = fopen(filename, 'w');
if A0<2
    T0=0;
End
fprintf(fileID,'T0      A0      t0std1  t0mean  t0std      Noobs
\n');
fprintf(fileID,'%1.2f %7.2f %7.2f %6.2f %8.2f %8.2f',[T0 A0
t0_std1 t0_mean t0_std j]);
fclose(fileID);
folder = 'D:\RHV_yeni\HVSRSONUÇLAR\rhvfigs2';
figurename = strcat(stationcode,'_rhv','.fig') ;

```

Şekil A.1. (Devam)

## EK-B

İvme dosyalarını okutan alt program;

```
function [ivme, expression] = readaccfilee(file, expression)
    % This program was created by Erman Şentürk & Hamdullah Livaoğlu
    % Created Date: 2018/03/07
    % Sample file name: //
file='F:\responseSpectra_h1\4118\20140205015644_4117.txt';
expression = 'PLACE,EPICENTER COORDINATES';

    if nargin == 1
        expression = '';
    else
        expression = regexp( expression , ',', 'split');
    end

    str = fileread( file );
    ca1 = regexp( str, '(?<=STRONG GROUND MOTION RECORDS OF
TURKIYE).+?(?=Copyright*)', 'match' );
    buf = regexp( ca1 , '\n', 'split');
    eqparameter = regexp( buf{:}(2:end-1) , ':', 'split','once');
    hamd = [eqparameter{:}];
    for mm = 1 : length(expression)
        IndexC = strfind(hamd, expression{mm});
        Index = find(not(cellfun('isempty', IndexC)));
        expression(mm) = hamd(Index+1);
    end

    ca2 = regexp( str, '(?<=          N-S          E-W          U-
D).+?(.*)', 'match' );
    ba = regexp( ca2, '\n', 'split' );
    data_all = ba{:}(2:end);
    ivme = str2num([data_all{:}]);
end
```

Şekil B.1. İvme dosyalarını okutan alt program

## EK-C

### Tepki spektrumlarını hesaplayan alt program

```
function [PSA, PSV, SD] = responseSpectrahl(xi, sPeriod, gacc,
dt);
% PSEUDO SPEKTRAL İVME, PSEUDO SPEKTRAL HIZ VE SPEKTRAL
% YERDEĞİŞTİRME
%HAREKER DİF.DENKLEMİNİN ÜSTEL MATRİS ÇÖZÜMÜ İLE
%12.01.2018 DE DÜZENLENDİ
for i = 1:length(sPeriod);
    omegan = 2*pi/sPeriod(i);
    C = 2*xi*omegan;
    K = omegan^2;
    y(:,1) = [0;0];
    A = [0 1;-K -C];
    Ae = expm(A*dt);
    AeB = A \ (Ae-eye(2)) * [0;1];

    for k = 2:length(gacc);
        y(:,k) = Ae*y(:,k-1) + AeB*gacc(k);
    end

    displ = (y(1,:))';
    veloc = (y(2,:))';
    foverm = omegan^2*displ;
    absacc = -C*veloc-foverm;

    % Spektral değerler
    displ_max(i) = max(abs(displ));
    veloc_max(i) = max(abs(veloc));
    absacc_max(i) = max(abs(absacc));
    foverm_max(i) = max(abs(foverm));
    pseudo_acc_max(i) = displ_max(i)*omegan^2;
    pseudo_veloc_max(i) = displ_max(i)*omegan;
    PSA(i) = pseudo_acc_max(i);
    PSV(i) = pseudo_veloc_max(i);
    SD(i) = displ_max(i);
end
```

Şekil C.1. Tepki spektrumlarını hesaplayan alt program

## EK-Ç

Zemin sınıflandırılmalarını ortalama spektrum eğrilerine göre kestirip sonuçları istasyon kodlarına göre kaydeden program

```
%spearman rank uyum katsayısınınagöre zemin sınıfı kestirimi, j+end-5 şeklinde
%ilerleyip sonuc dosyalarını ayrı ayrı istasyon kodunda kaydeder
%hamdullah livaoğlu,12.03.2020

clc,clear,close all

filefolder = fullfile(pwd);
myfiles = dir(fullfile(filefolder,'*.fig'));

for i = 1 : length(myfiles)
open(myfiles(i).name);
a = get(gca,'Children');
xdata = get(a,'XData');
ydata = get(a,'YData');

if isequal(a(end-1).Type , 'area')
    meanx{i} = xdata{1};
    meany{i} = ydata{1};
else
if length(xdata{1}) == length(xdata{end})
    meanx{i} = xdata{2};
    meany{i} = ydata{2};
else
    meanx{i} = xdata{length(a)};
    meany{i} = ydata{length(a)};

    if isequal(a(end).Type , 'patch')

    meanx{i} = xdata{length(a)-1}; %patch var ise
    meany{i} = ydata{length(a)-1};

    else
    meanx{i} = xdata{7};
    meany{i} = ydata{7};

end

end
end
leg(i)=textscan(myfiles(i).name,'%4c', 1);

close all
```

Şekil Ç.1. Zemin sınıflarını istasyon kodlarına göre kaydeden program

```

% rho = corr(meanx, meany, 'type', 'Spearman');
% ro(i)=spear(meany{1}',meany{i+1}');
% ro(i)=max(ro(i));
% delete(myfiles(1).name)
% rho = corr(meanx{i}, meany{i}, 'type', 'Spearman');
end
% hold on
% h1=figure (1);
for j = 1 : length(myfiles)
%     for j = (length(myfiles)-4):length(myfiles)

% plot(meanx{j}, (meany{j}))

% leg(j)=textscan(myfiles(j).name,'%4c', 1);
try

ro(j)=spear (meany{1}',meany{j+length(myfiles)-5}');
ro(j)=max(abs(ro(j)));

zs=find(ro==max(ro));

roi=sort(ro);
ix=roi(end)-roi(end-1);

ix1=ro(2)-ro(1);
ix2=ro(3)-ro(2);
ix3=ro(4)-ro(3);
ix4=ro(end)-ro(end-1);
ix5=ro(end)-ro(end-1);

end

end

hvmax=max(meany{1});
indis=find(meany{1}==hvmax);
t0=meanx{1}(indis);

aa=zs==1;    b=t0<0.14;                c=abs(ix1)<0.1;
d=zs==2;    e=t0>=0.14 && t0<0.26;    f=abs(ix2)<0.1;
g=zs==3;    h=t0>0.26 && t0<=0.51;    k=abs(ix3)<0.1;
l=zs==4;    m=t0>0.51;                n=abs(ix4)<0.1;

u=zs==5;    v=t0>0.77;                yz=abs(ix5)>0.1;

dfile='output.txt';
if exist(dfile, 'file') ; delete(dfile); end
diary(dfile)
diary on
if (aa+b+c)>=2
    z1a='ZA';
    disp('ZA ')
end

```

Şekil Ç.1. (Devam)

```

if (d+e+f)>=2
    z1b= 'ZB';
    disp('ZB ')
end

if (g+h+k)>=2
    z1c= 'ZC';
    disp('ZC ')
end

if (l+m+n) >=2
    z1d= 'ZD';
    disp('ZD ')
end

if (u+v+yz) >=2
    z1e= 'ZE';
    disp('ZE ')
end
%%

if (aa+b+c)==(d+e+f) && b==1 && ro(1)>=ro(2) && ro(1)>=ro(3) &&
ro(1)>=ro(4) & ro(1)>=ro(5)
    z2a='ZA';
    disp('ZA ')
end

if (g+h+k)==(d+e+f) && e==1 && ro(2)>=ro(1) && ro(2)>=ro(3) &&
ro(2)>=ro(4) && ro(2)>=ro(5)
    z2b='ZB';
    disp('ZB ')
end

if (g+h+k)>=(l+m+n) && h==1 && ro(3)>=ro(4) && ro(3)>=ro(1) &&
ro(3)>=ro(2)
    z2c='ZC';
    disp('ZC ')
end

if (g+h+k)<=(l+m+n) && h==0 ro(4)>=ro(3) && ro(4)>=ro(2) | l==1 |
t0>=0.65;
    z2d='ZD';
    disp('ZD ')
end

```

Şekil Ç.1. (Devam)



```

if (u+v+yz)<=(l+m+n) && v==1 ro(5)>=ro(4) && ro(5)>=ro(3) | u==1 |
t0>=0.77;
    z2e='ZE';
    disp('ZE ')

end

%%
if aa==1 && b==1
    z3a='ZA';

    disp('ZA ')
end

if d==1
    z3b='ZB';
    disp('ZB ')
end

if g==1
    z3c='ZC';
    disp('ZC ')
end

if l==1 | ro(4)>=0.75 && ro(5)<=0.99 && h==1
    z3d='ZD';
    disp('ZD ')
end

if u==1 | ro(5)>=0.75 && ro(5)<=0.99 && v==1
    z3e='ZE';
    disp('ZE ')
end

diary off
%%
% if z1a==z2a | z1a==z3a | z2a==z3a
%     zz='ZA';
% end
%
% if z1b==z2b | z1b==z3b | z2b==z3b
%     zz='ZB';
% end
%
% if z1c==z2c | z1c==z3c | z2c==z3c
%     zz='ZC';
% end
%
% if z1d==z2d | z1d==z3d | z2d==z3d
%     zz='ZD';
% end

```

Şekil Ç.2. (Devam)

```

%
% if z1e==zed | z1e==z3e | z2e==z3e
%     zz='ZE';
% end

% legend(leg)
% st=cell2mat(textscan(myfiles(1:end-5).name,'%4c', 1));
zz=importdata('output.txt');
% zzc=cell2mat(zz);
% stationcode = st;
stationcode = cell2mat(leg(1));
folder1='D:\RHV_yeni\gruplama\ybölgeler\vs30\spearman\vs30otosonuc
lar';
dosyaismi=[stationcode,'_vs30','.txt'];
filename = fullfile(folder1, dosyaismi);
fileID = fopen(filename, 'w');

if isequal(zz,[])
    zz='YOK'

fprintf(fileID,'İstasyon           Zemin Sınıfı           \n');
fprintf(fileID,'%s           ',stationcode,zz );
% fprintf(fileID,'%s           ',st,zz );
fclose(fileID);
else
fprintf(fileID,'İstasyon           Zemin Sınıfı           \n');
fprintf(fileID,'%s           ',stationcode,zz{:} );
% fprintf(fileID,'%s           ',st,zz );
fclose(fileID);

end
if length(myfiles)==6
    return
end
delete(myfiles(1).name)
spry

```

Şekil Ç.1. (Devam)

## EK-D

Tablo D.1. Tüm istasyonlara ait sonuçlar. prhv:tepki spektrum çözümleri sonucu elde edilen baskın periyotlar, pfhv:Fourier çözümleri sonucu elde edilen baskın periyotlar, arhv ve afhv sırasıyla tepki ve Fourier çözümlerinin spektral büyütme, no: istasyonda analize tabi tutulan deprem sayısı, stdr: sırasıyla tepki, Konno-Ohmachi fonksiyonu ile yumuşatılan ve kayan ortalama ile yumuşatılan Fourier spektrumlarının baskın periyotlara ait standart sapmaları. YZS: mevcut  $V_{S30}$ 'lara göre sınıflandırılan istasyonlar, YZS\_T: kestirilen zemin sınıfları, ZS: periyodik bazlı sınıflamalar, ZS\_T: periyodik bazlı sınıflamaların kestirimi, YOK!:  $V_{S30}$  bilgisi olmayan istasyonlar.

İst.	Vs30	prhv	pfhv	arhv	afhv	no	stdr	stdfk	stdfm	YZS	YZS_T	ZS	ZS_T
4114	344	0.26	0.22	5.58	5.97	11	0.06	0.06	0.04	ZD	ZA	ZS2	ZS2
4115	253	nd	0.16	nd	2.60	10	-	-	0.17	ZD	ZB	ND	ZS2
4116	181	0.52	0.54	4.72	4.52	12	0.13	0.10	0.31	ZD	ZD	ZS3	ZS2
4117	282	nd	0.22	nd	2.75	13	-	-	0.10	ZD	ZD	ND	MP
4118	190	nd	0.22	nd	3.10	19	-	-	0.06	ZD	ZD	ND	ZS2
4119	884	nd	nd	nd	nd	12	-	-	-	ZB	ZC	ND	ZS2
4120	214	0.81	nd	4.27	nd	10	0.23	-	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4121	286	0.66	0.71	3.15	2.63	14	0.31	8.28	0.08	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4122	303	0.35	0.32	3.30	2.63	10	0.24	2.02	0.07	ZD	ZD	ZS3	ZS3
4123	279	0.40	0.40	2.89	2.61	8	0.14	-	0.05	ZD	ZD	ZS3	ZS3
4124	906	0.37	0.38	2.40	2.83	6	0.09	2.55	0.12	ZB	ZB	ZS3	ZS3
4126	188	0.69	0.63	4.39	4.94	14	0.15	0.21	0.93	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4127	215	mp	0.20	mp	1.61	6	-	-	0.10	ZD	ZD	MP	ND
4128	258	mp	0.16	mp	3.12	7	-	-	0.07	ZD	ZD	MP	ZS2
4130	484	0.41	0.51	3.93	3.96	7	0.16	0.68	0.11	ZC	ZC	ZS3	ZS3
1602	272	0.64	nd	3.35	nd	5	0.16	-	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
1618	314	0.40	0.33	3.90	4.24	23	0.21	-	0.11	ZD	ZD	ZS3	ZS3
1621	396	0.39	0.60	2.89	2.34	28	0.22	-	0.15	ZC	ZC	ZS3	ZS3
1631	410	0.29	0.28	4.72	5.30	37	0.11	-	0.10	ZC	ZC	ZS2	ZS2
1633	375	0.55	nd	2.57	nd	42	0.31	-	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4
1702	364	0.30	0.32	3.10	3.10	4	0.35			ZC	ZC	ZS3	ZS3
1708	1005	0.31	0.34	3.40	3.16	200	0.22	0.13	0.08	ZB	ZC	ZS3	ZS3
1711	403	0.50	nd	3.01	nd	134	0.14	-	-	ZC	ZC	ZS3	ZS3
1713	483	0.35	0.29	3.56	3.17	110	0.23	0.55	0.05	ZC	ZC	ZS3	ZS3
1714	429	0.40	0.40	2.12	2.10	116	0.39	0.89	0.19	ZC	ZC	ZS3	ZS3
1715	214	0.97	1.17	2.52	3.86	42	0.07	0.59	0.22	ZD	ZD	ZS4	ZS2
1716	366	0.17	0.17	5.46	4.85	120	0.14	0.10	0.08	ZC	ZC	ZS2	ZS2
1717	238	0.81	0.81	3.69	4.77	21	0.04	0.03	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3402	415	-	-	-	-	2				ZC			
3405	543	0.14	0.10	2.74	4.63	21	0.20	0.10	0.03	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3406	436	0.30	0.30	3.33	3.33	17	0.05	0.11	0.09	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3410	587	0.15	0.15	3.83	4.09	20	0.05	1.21	0.06	ZC	ZD	ZS2	ZS2

Tablo D.1 (Devam)

İst.	Vs30	prhv	pfhv	arhv	afhv	no	stdr	stdfk	stdfm	YZS	YZS_T	ZS	ZS_T
3411	323	0.22	0.14	4.38	4.15	25	0.06	3.30	0.06	ZD	ZD	ZS2	ZS2
3412	247	1.00	1.07	2.49	3.46	25	0.30	0.12	4.06	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3413	452	0.21	0.19	2.46	2.43	20	0.17	1.91	0.09	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3416	420	mp	mp	mp	mp	16	-	-	-	ZC	ZC	MP	MP
3417	1747	0.18	0.12	2.39	2.30	17	0.15	4.90	0.08	ZA	ZA	ZS2	ZS2
3418	1182	mp	0.10	mp	2.78	10	-	0.20	0.08	ZB	ZB	MP	ZS2
5403	215	0.70	0.68	2.44	3.15	19	0.24	0.12	2.76	ZD	ZD	ZS4	ZS4
5404	381	nd	0.12	nd	2.59	14	-	3.98	0.08	ZC	ZC	ND	ZS1
5405	401	0.26	0.27	3.44	2.77	13	0.22	0.10	0.05	ZC	ZC	ZS2	ZS2
5906	224	0.46	0.47	5.52	7.72	54	0.17	0.24	2.02	ZD	ZD	ZS3	ZS3
5907	313	0.23	0.94	3.02	3.62	15	0.29	0.10	-	ZD	ZB	ZS2	ZS2
5908	538	nd	0.10	nd	3.27	36	-	-	0.07	ZC	ZC	ND	ND
5909	361	nd	0.18	nd	2.95	3	-	-	0.25	ZC	ZC	ND	ZS2
5910	514	0.14	0.11	7.82	6.99	45	0.12	1.38	0.03	ZC	ZD	ZS2	ZS2
7706	277	0.75	0.23	4.10	5.14	47	0.10	0.13	0.13	ZD	ZC	ZS4	ZS2
7707	312	nd	nd	nd	nd	35	-	-	-	ZD	ZD	ND	MP
7709	382	0.23	0.22	2.35	2.33	28	0.20	3.78	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
7711	199	0.80	nd	3.23	nd	32	0.33	-	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
7712	280	mp	nd	mp	nd	22	-	-	-	ZD	ZC	MP	ZS3
8109	183	0.45	0.42	6.88	5.44	15	0.08	0.10	0.13	ZD	ZD	ZS3	ZS3
8110	407	0.23	0.20	6.35	8.03	14	0.03	0.35	0.09	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3112	233	0.64	nd	3.09	nd	15	0.41	-	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3113	221	nd	0.12	nd	2.69	27	-	4.84	0.06	ZD	ZD	ND	ZS1
3114	215	0.64	nd	2.71	nd	25	0.33	-	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3115	424	0.24	0.28	1.90	1.83	28	0.38	4.64	0.05	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3116	781	nd	nd	nd	nd	22	-	-	-	ZB	ZD	ND	ZS3
3117	597	0.35	0.42	3.38	3.77	15	0.10	5.11	0.14	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3119	374	nd	0.12	nd	2.58	24	-	-	0.05	ZC	ZB	ND	ZS1
3120	455	0.45	0.48	2.42	2.76	25	0.39	2.69	0.06	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3121	271	0.37	0.62	4.16	5.07	35	0.11	0.27	0.08	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3134	374	nd	nd	nd	nd	27	-	-	-	ZC	ZC	ND	ZS2
3122	1011	nd	nd	nd	nd	4	-	-	-	ZB	ZB	ND	ZS4
3124	283	0.78	0.81	2.96	3.56	16	0.32	0.10	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3125	448	0.20	0.20	2.33	2.08	22	0.20	0.20	0.10	ZC	ZD	ZS2	ZS2
3126	350	0.13	0.14	3.20	3.34	22	0.15	0.05	0.04	ZD	ZD	ZS1	ZS1
3127	404	0.17	0.16	3.92	4.18	23	0.18	0.90	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3128	329	0.13	0.13	3.29	3.28	17	0.03	0.10	0.06	ZD	ZD	ZS1	ZS1
3129	447	nd	nd	nd	nd	15	-	-	-	ZC	ZC	ND	ND
3130	447	0.08	0.08	5.43	6.58	16	0.01	0.90	0.07	ZC	ZC	ZS1	ZS1
3131	567	0.34	nd	2.03	nd	11	0.38	-	-	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3132	377	mp	mp	mp	mp	19	-	-	-	ZC	ZC	MP	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

3133	471	nd	nd	nd	nd	14	-	-	-	ZC	ZD	ND	ZS3
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
3135	460	0.23	0.26	2.9	0.52	20	0.26	3.95	0.11	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3143	444	0.54	0.15	2.14	2.76	15	0.04	0.18	0.05	ZC	ZD	ZS4	ZS4
3144	485	0.46	0.53	3.12	3.95	15	0.37	0.20	1.90	ZC	ZD	ZS3	ZS3
3145	533	0.23	0.13	2.10	2.02	15	0.16	0.95	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS1
3505	384	0.35	0.39	2.90	4.90	4	0.11	0.2	0.15	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3506	771	0.35	0.28	2.77	2.55	51	0.36	3.36	2.31	ZB	ZB	ZS3	ZS3
3507	1030	-	-	-	-	0	-	-	-	ZB			
3508	558	0.21	0.25	4.48	4.06	98	0.23	2.89	2.72	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3509	286	0.52	0.16	3.67	2.13	37	0.16	6.75	0.86	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3510	313	0.22	0.21	5.99	5.55	87	0.24	3.6	0.31	ZD	ZD	ZS2	ZS2
3511	827	0.22	0.25	2.81	2.46	60	0.3	3.8	2.22	ZB	ZB	ZS2	ZS2
3512	468	0.14	0.14	3.83	3.87	44	0.36	4.23	1.02	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3513	196	0.37	nd	2.27	nd	41	0.34	4	4.12	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3514	836	0.79	0.79	2.26	2.40	62	0.34	4.46	4.31	ZB	ZD	ZS4	ZS4
3515	171	0.50	0.48	2.83	3.60	60	0.35	4.56	2.48	ZE	ZE	ZS3	ZS3
3516	460	0.70	nd	2.84	nd	50	0.36	1.55	5.35	ZC	ZD	ZS4	ZS4
3517	695	0.37	1.70	0.37	1.76	25	0.53	1.57	2.45	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3518	298	0.40	0.37	2.50	2.31	30	0.34	6.25	2.85	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3519	131	0.79	0.83	3.32	4.61	74	0.27	3.88	4.19	ZE	ZE	ZS4	ZS4
3520	875	0.34	0.28	1.95	1.97	63	0.4	4.15	0.79	ZB	ZB	ZS3	ZS3
3521	145	0.38	nd	3.88	nd	51	0.32	4.14	4.75	ZE	ZD	ZS3	ZS3
3522	249	0.33	0.34	3.47	4.14	27	0.37	4.83	4.37	ZD	ZC	ZS3	ZS3
3523	414	0.47	0.42	3.18	2.70	66	0.15	3.46	0.52	ZC	ZC	ZS3	ZS3
3524	459	0.70	0.63	2.36	2.44	75	0.43	1.44	3.96	ZC	ZD	ZS4	ZS4
3525	745	0.64	0.63	2.48	2.76	70	0.37	3.26	3.19	ZC	ZC	ZS4	ZS4
3526	205	0.45	0.45	3.33	3.83	48	0.42	4.55	3.6	ZD		ZS3	ZS3
3527	207	0.11	0.06	1.92	2.48	64	0.17	3.61	0.91	ZD	ZD	ZS1	ZS1
3528	532	0.89	0.83	2.59	3.20	45	0.41	3.17	2.97	ZC	ZC	ZS4	ZS4
3529	306	0.75	0.77	3.93	5.36	10	0.33	1.5	5.07	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3530	270	0.75	0.75	3.37	4.15	66	0.27	3.93	5.64	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3531	271	0.14	3.02	0.15	3.20	45	0.29	3.93	0.05	ZD	ZD	ZS2	ZS2
3532	328	0.37	2.74	0.36	3.05	80	0.26	3.98	2.3	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3533	415	0.30	3.72	0.26	3.13	70	0.23	3.9	1.13	ZC	ZC	ZS3	ZS2
3534	328	0.44	0.43	3.67	3.66	157	0.4	3.03	2.68	ZD	ZC	ZS3	ZS3
3535	361	0.64	2.25	0.65	2.38	111	0.36	4.46	3.03	ZC	ZD	ZS4	ZS4
3536	1141	0.14	2.93	0.14	2.76	105	0.39	3.27	1.42	ZB	ZA	ZS2	ZS2
3537	608	0.61	1.96	flat	flat	68	0.28	4.01	4.89	ZC	ZC	ZS4	ZS4
3538		0.92	0.90	2.49	2.88	67	0.43	2.79	1.97	YOK!	ZE	ZS4	ZS4
3539		0.17	0.21	2.21	2.12	86	0.24	3.02	0.14	YOK!	ZB	ZS2	ZS2
3540		0.12	0.12	2.64	4.48	2	0	0	0.03	YOK!	ZD	ZS1	ZS1

Tablo D.1 (Devam)

3541		0.15	0.12	1.31	1.49	2	0.07	0.14	0.04	YOK!	ZB	ZS2	ND
1002	429	-	-	-	-	0	-	-	-	ZC			
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
1004	311	0.35	0.36	3.49	2.86	3	0.15	4.23	0.01	ZD	ZC	ZS3	ZS2
1015	312	0.89	0.91	4.53	6.36	59	0.28	2.14	4.31	ZD	ZD	ZS4	ZS4
1016	430	0.60	0.59	3.30	3.77	78	0.27	2.77	4.18	ZC	ZD	ZS4	ZS4
1018	555	nd	nd	nd	nd	26	0.21	2.28	1.96	ZC	ZB	ND	ZS2
1019	444	0.17	0.18	3.10	2.88	104	0.35	2.94	0.35	ZC	ZB	ZS2	ZS2
1020	293	0.45	0.45	5.64	7.79	39	0.05	1.84	0.87	ZD		ZS3	ZS3
911	307	mp	nd	mp	nd	61	0.21	2.91	2.14	ZD	ZD	MP	MP
917	580	mp	0.10	mp	3.03	60	0.37	2.17	0.02	ZC	ZD	MP	ZS1
918	630	0.37	nd	1.95	nd	91	0.37	2.25	2.35	ZC	ZC	ZS3	ZS3
919	986	0.17	nd	2.31	nd	118	0.22	2.27	0.55	ZB	ZB	ZS2	ZS2
920	894	0.37	nd	2.47	nd	61	0.25	2.54	1.63	ZB		ZS3	ZS3
4507	341	0.59	nd	2.97	nd	48	0.36	4.34	3.34	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4808	1323	0.10	0.09	3.22	3.27	106	0.33	3.27	0.04	ZB	ZB	ZS1	ZS1
4812	732	0.30	nd	1.72	nd	105	0.41	2.55	0.64	ZC	ZC	ZS3	ZS2
4813	1739	ndf	0.45	ndf	3.24	10	0.17	1.02	1.18	ZA	ZA	ND	ZS3
4814	694	0.13	0.06	2.62	2.91	90	0.15	3.48	0.02	ZC	ZD	ZS1	ZS1
4815	278	0.14	0.06	3.00	3.78	111	0.13	3.03	0.02	ZD	ZD	ZS2	ZS1
4816	236	mp	0.43	mp	3.87	45	0.40	2.39	0.47	ZD	ZD	MP	ZS3
101	478	mp	mp	mp	mp	5	1.30	5.66	-	ZC	ZD	MP	ND
102	417	nd	nd	nd	nd	10	0.46	4.52	4.60	ZC	ZC	ND	ZS4
103	423	0.47	0.22	5.88	4.43	10	0.12	1.18	0.27	ZC	ZC	ZS3	ZS3
106	210	0.71	0.68	5.77	4.67	4	0.25	0.65	6.33	ZD	ZD	ZS4	ZS4
107	405	0.26	0.33	3.54	2.51	18	0.52	2.30	0.74	ZC	ZD	ZS2	ZS2
108	654	nd	0.10	nd	2.69	29	-	2.39	0.03	ZC	ZC	ND	ZS1
109	253	nd	0.20	nd	3.24	9	0.10	0.43	0.10	ZD	ZC	ND	ZS2
111	461	0.21	0.26	5.70	3.75	3	0.04	0.03	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
112	490	nd	nd	nd	nd	8				ZC	ZC	ND	ND
113	267	0.45	0.63	3.29	3.59	11	0.56	0.33	1.39	ZD	ZD	ZS3	ZS3
114	483	0.43	0.30	2.98	2.72	14	0.50	1.39	0.21	ZC	ZC	ZS3	ZS3
115	322	0.14	0.13	3.76	3.80	19	0.04	3.46	0.02	ZD	ZD	ZS2	ZS2
116	466	nd	nd	nd	nd	4	0.44	0.70		ZC	ZC	ND	MP
117	215	0.23	0.42	8.05	5.28	7	0.18	1.65	0.35	ZD	ZC	ZS2	ZS2
120	439	0.22	0.21	3.06	2.88	12	0.51	4.43	0.08	ZC	ZC	ZS2	ZS2
122	501	0.14	0.14	2.66	2.86	27	0.33	3.25	0.69	ZC	ZB	ZS2	ZS2
123	519	0.20	0.25	3.63	3.76	8	0.62	1.35	0.08	ZC	ZC	ZS2	ZS2
124	583	0.16	0.16	2.72	2.85	5	0.04	1.38	0.07	ZC	ZD	ZS2	ZS2
125	216	0.41	0.42	4.39	4.61	12	0.49	4.20	0.31	ZD	ZD	ZS3	ZS3
126	521	nd	nd	nd	nd	7	0.40	5.42	0.10	ZC	ZC	ND	MP
127	583	0.38	nd	2.33	nd	6	0.70	5.55	0.26	ZC	ZC	ZS3	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

128	494	mp	0.10	mp	5.04	5	0.34	2.21	0.04	ZC	ZC	MP	ZS1
129	965	0.09	0.09	2.43	2.39	6	0.08	0.10	0.02	ZB	ZB	ZS1	ZS1
203	384	0.96	0.98	4.34	7.86	2	0.17	2.31	0.01	ZC	ZC	ZS4	ZS4
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
204	555	mp	mp	mp	mp	27	0.31	3.37	1.71	ZC	ZC	MP	MP
205	660	nd	nd	nd	nd	44	0.35	3.97	3.83	ZC	ZC	ND	ND
206	863	nd	0.16	nd	1.82	45	3.83	3.88	2.67	ZB	ZC	ND	ND
207	660	0.22	0.19	3.28	3.32	40	0.07	3.33	0.07	ZC	ZC	ZS2	ZS2
303	222	nd	0.40	nd	2.68	9	0.75	0.64	0.16	ZD	ZC	ND	ND
304	210	0.14	0.16	2.73	2.47	31	0.22	2.61	0.33	ZD	ZC	ZS2	ZS2
305	217	0.42	nd	4.07	nd	17	0.30	2.40	2.45	ZD	ZD	ZS3	ZS3
306	206	0.27	0.19	8.35	5.83	33	0.07	1.49	0.03	ZD	ZC	ZS2	ZS2
307	567	mp	mp	mp	mp	4				ZC	ZC	MP	ZS3
310	449	0.49	0.51	2.97	3.67	5	0.05	0.64	0.39	ZC	ZC	ZS3	ZS3
311	183	0.61	0.75	4.68	5.24	3	0.10	0.50	1.45	ZD	ZD	ZS4	ZS4
6801	214	0.73	0.68	2.94	3.69	5	0.25	0.58	6.42	ZD	ZD	ZS4	ZS4
503	514	-	-	-	-	0	-	-	-	ZC			
508	942	0.32	0.34	3.96	3.78	8	0.37	2.96	0.15	ZB	ZC	ZS3	ZS3
509	373	0.21	0.16	3.13	2.78	10	0.09	2.32	0.09	ZC	ZC	ZS2	ZS3
510	363	nd	mp	nd	mp	5	0.29	1.99	0.26	ZC	ZC	ND	ND
511	415	0.23	0.21	2.53	2.61	14	0.34	5.38	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
512	201	0.52	nd	4.00	nd	10	0.19	4.58	1.42	ZD	ZD	ZS3	ZS3
707	1822	0.10	flat	2.00	flat	23	0.24	5.82	0.44	ZA	ZA	ZS1	ZS1
713	540	0.17	0.18	7.12	6.12	4	0.01	2.48	7.43	ZC	ZC	ZS2	ZS2
714	607	0.10	0.11	2.84	2.80	5	0.27	0.17	0.35	ZC	ZC	ZS1	ZS1
715	285	0.68	0.75	3.84	4.92	2	1.29	1.29	7.95	ZD	ZD	ZS4	ZS4
716	813	nd	nd	nd	nd	11	0.65	4.72	5.85	ZB	ZC	ND	ND
717	724	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
7502	555	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
7503	437	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
7402	603	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
1407	273	nd	0.08	nd	2.94	12	0.04	5.76	0.03	ZD	ZD	ND	ZS1
1409	362	mp	0.11	mp	3.95	11	0.13	2.26	0.04	ZC	ZC	MP	ZS1
1410	338	0.84	nd	2.73	nd	9	0.59	0.93	5.04	ZD	ZD	ZS4	ZS4
1411	229	0.43	0.13	3.38	3.04	15	0.53	2.36	1.05	ZD	ZD	ZS3	ZS3
1506	337	0.87	nd	2.86	nd	14	0.35	5.20	2.37	ZD	ZD	ZS4	ZS4
1507	359	nd	nd	nd	nd	11	0.35	4.18	0.21	ZD	ZE	ND	ND
1508	206	0.34	nd	3.30	nd	13	0.21	6.79	0.18	ZD	ZD	ZS3	ZS3
1805	335	0.34	nd	2.38	nd	13	0.22	5.35	4.38	ZD	ZD	ZS3	ZS3
1806	885	0.13	0.14	3.01	2.48	10	0.11	0.12	0.05	ZB	ZB	ZS1	ZS1
1807	1076	nd	0.07	nd	2.01	5	0.28	-	0.01	ZB	ZB	ND	ND
2008	560	0.32	0.10	2.33	2.22	5	0.13	0.41	0.05	ZC	ZB	ZS3	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

2012	462	0.11	0.10	2.59	2.79	33	0.28	4.00	0.03	ZC	ZC	ZS1	ZS1
2017	303	0.93	nd	2.19	nd	33	0.36	4.25	3.11	ZD	ZD	ZS4	ZS4
2018	549	0.46	nd	1.60	nd	40	0.42	3.41	2.45	ZC	ZC	ZS3	ZS3
2019	567	nd	0.11	nd	2.65	40	0.15	0.08	0.05	ZC	ZC	ND	ZS1
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
2020	477	0.19	0.19	2.69	2.87	26	0.19	0.05	0.04	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2201	315	0.36	0.27	3.30	2.91	46	0.34	0.08	0.08	ZD	ZD	ZS3	ZS3
2202	322	0.22	0.18	3.72	3.17	7	0.12	5.81	0.27	ZD	ZD	ZS2	ZS2
2203	709	0.41	0.17	2.57	2.37	23	0.15	0.11	0.05	ZC	ZC	ZS3	ZS3
2204	441	0.07	0.07	4.21	4.99	8	0.08	0.09	0.02	ZC	ZB	ZS1	ZS1
2304	489	0.20	0.18	3.64	3.35	71	0.18	0.10	0.05	ZC	ZD	ZS2	ZS2
2305	907	nd	0.17	nd	2.15	25	0.10	0.16	0.06	ZB	ZC	ND	ZS2
2306	663	0.24	0.23	2.81	2.51	21	0.34	0.04	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2308	450	0.28	0.32	3.30	2.81	29	0.13	0.10	0.07	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2309	860	0.10	0.09	2.23	2.46	35	0.12	0.10	0.05	ZB	ZC	ZS1	ZS1
2402	455	-	-	-	-	2	-	-	-	ZC			
2404	567	0.12	0.11	3.70	3.86	14	0.11	0.13	0.02	ZC	ZD	ZS1	ZS1
2408	416	0.29	mp	2.29	mp	17	0.17	-	-	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2409	875	0.15	nd	2.45	bd	25	0.20	-	-	ZB	ZB	ZS2	ZS2
2410	541	0.13	0.10	2.41	2.60	7	0.20	0.11	0.04	ZC	ZC	ZS1	ZS1
2411	284	0.34	0.41	6.03	4.95	19	0.35	0.2	0.07	ZD	ZC	ZS3	ZS3
2412	955	nd	0.14	nd	2.51	6	0.33	6.06	0.05	ZB	ZB	ND	ZS3
2413	435	0.15	0.16	3.38	3.08	7	0.03	0.35	0.06	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2414	372	0.53	0.60	2.15	2.71	9	0.44	0.85	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4
2415	444	0.48	0.54	3.48	3.43	4	0.06	0.07	-	ZC		ZS3	ZS3
2502	437	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
2504	301	-	-	-	-	1	-	-	-	ZD			
2506	365	0.49	0.50	4.87	5.70	6	0.09	0.10	0.30	ZC		ZS3	ZS3
2508	195	mp	nd	mp	nd	10	-	-	-	ZD	ZD	MP	ZS2
2509	495	nd	nd	nd	nd	5	-	-	-	ZC	ZE	ND	ND
2510	280	0.49	0.56	3.69	4.55	7	0.10	0.04	0.14	ZD		ZS3	ZS3
2511	375	0.27	0.11	2.27	3.51	37	0.18	0.10	0.04	ZC	ZB	ZS2	ZS1
2512	581	nd	nd	nd	nd	6	-	-	-	ZC	ZD	ND	ND
2513	303	0.32	0.25	3.38	3.28	18	0.26	0.22	0.13	ZD	ZD	ZS3	ZS3
2516	373	0.58	nd	3.18	nd	25	0.33	4.46	0.83	ZC	ZD	ZS4	ZS4
2515	308	-	-	-	-	1	-	-	-	ZD			
2518	367	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
2519	243	0.51	0.47	3.72	4.80	3	0.11	0.06	0.13	ZD	ZD	ZS3	ZS3
2520	398	0.21	mp	3.02	mp	2	0.01	-	-	ZC	ZD	ZS2	ZS2
2514	445	0.25	0.25	2.50	2.82	9	0.21	0.05	0.13	ZC		ZS2	ZS2
2704	721	nd	0.16	nd	2.68	22	-	-	0.08	ZC	ZD	ND	MP
2705	720	mp	mp	mp	mp	30	-	-	-	ZC	ZD	MP	MP



Tablo D.1 (Devam)

2707	558	mp	mp	mp	mp	9	-	-	-	ZC	ZD	MP	ZS4
2708	523	nd	mp	nd	mp	13	-	-	-	ZC	ZC	ND	ZS1
2709	555	0.41	0.43	3.08	3.34	10	0.22	0.10	0.30	ZC	ZC	ZS3	ZS3
2802	309	nd	nd	nd	nd	5	-	-	-	ZD	ZB	ND	ZS3
2803	425	0.49	nd	4.09	nd	3	0.10	-	-	ZC	ZC	ZS3	ZS3
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
2903	367	0.28	0.29	3.58	3.71	8	0.10	0.12	-	ZC	ZC	ZS2	ZS2
2904	521	0.17	0.12	2.50	2.29	8	0.19	-	0.14	ZC	ZB	ZS2	ZS2
4604	998	0.11	0.11	3.49	3.06	3	0.03	0.04	0.03	ZB	ZB	ZS1	ZS1
4611	731	0.07	0.07	5.04	6.10	27	0.01	-	0.02	ZC	ZD	ZS1	ZS1
4612	246	mp	1.07	mp	5.12	31	-	2.77	0.09	ZD	ZB	MP	ZS2
4614	541	nd	mp	nd	mp	34	-	-	-	ZC	ZB	ND	ZS1
4617	574	nd	0.27	nd	1.83	24	-	-	0.07	ZC	ZC	ND	ZS3
4618	715	0.37	nd	2.02	nd	22	0.24	-	-	ZC	ZB	ZS3	ZS3
4619	545	0.30	0.25	2.38	2.18	25	0.24	0.10	0.06	ZC	ZB	ZS3	ZS3
4620	484	0.22	mp	2.61	mp	23	0.20	-	-	ZC	ZC	ZS2	ZS2
4621	714	0.10	0.11	2.62	2.59	23	0.13	0.06	0.06	ZC	ZC	ZS1	ZS1
4622	440	0.37	nd	2.10	nd	16	0.22	-	-	ZC	ZC	ZS3	ZS3
4623	561	0.25	0.31	2.41	2.18	24	0.14	0.22	0.16	ZC	ZC	ZS2	ZS2
4624	280	0.20	0.23	3.34	3.42	25	0.13	0.15	0.06	ZD	ZD	ZS2	ZS2
4628	186	0.55	1.15	6.25	7.46	11	0.13	0.22	0.12	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4629	382	0.31	0.32	6.22	5.21	10	0.05	0.35	0.10	ZC	ZC	ZS3	ZS3
4630	347	nd	0.15	nd	2.35	13	-	-	0.10	ZD	ZD	ND	ZS2
4631	543	0.38	0.65	3.79	3.46	19	0.18	0.10	0.07	ZC	ZC	ZS3	ZS3
4632	428	0.90	nd	2.56	nd	12	0.31	-	-	ZC	ZB	ZS4	ZS4
7801	530	nd	0.10	nd	4.68	6	-	0.07	0.05	ZC	ZC	ND	ZS1
7802	393	0.32	0.44	2.74	2.49	10	0.32	2.24	0.08	ZC	ZD	ZS3	ZS3
7002	404	mp	0.83	mp	3.65	3	-	0.11	-	ZC	ZC	MP	MP
3603	417	mp	nd	mp	nd	2	-	-	-	ZC	ZC	MP	ZS3
3604	641	nd	nd	nd	nd	4	-	-	-	ZC	ZC	ND	ND
3703	299	mp	0.18	mp	3.92	2	0.24	0.12	0.10	ZD	ZD	MP	MP
3704	466	nd	nd	nd	nd	2	-	-	-	ZC	ZD	ND	MP
3802	305	mp	0.16	mp	2.48	15	-	-	0.08	ZD	ZD	MP	ZS2
3803	499	nd	nd	nd	nd	4	-	-	-	ZC	ZC	ND	ND
3804	637	nd	nd	nd	nd	7	-	-	-	ZC	ZD	ND	ND
3901	500	0.27	nd	3.00	nd	2	0.43	-	-	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3902	317	0.54	0.56	5.83	5.43	11	0.46	0.28	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
3903	515	nd	nd	nd	nd	2	-	-	-	ZC	ZC	ND	MP
7901	463	0.18	0.50	4.37	4.39	13	0.04	0.06	0.07	ZC	ZC	ZS2	ZS2
4203	280	0.32	0.27	6.09	4.32	2	0.01	0.10	0.01	ZD	ZC	ZS3	ZS3
4204	458	0.67	nd	2.74	nd	5	0.12	-	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4
4205	363	0.64	nd	3.55	nd	10	0.15	-	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4

Tablo D.1 (Devam)

4206	458	nd	nd	nd	nd	3	-	-	-	ZC	ZC	ND	ZS1
4207	406	0.72	nd	3.08	nd	7	0.20	-	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4
4208	286	mp	0.17	mp	3.55	9	-	0.76	0.07	ZD	ZD	MP	ZS2
4307	438	nd	0.17	nd	2.46	9	-	-	0.09	ZC	ZC	ND	ZS1
4308	391	0.20	-	3.35	-	10	0.25	-	-	ZC	ZD	ZS2	ZS2
4310	593	0.21	0.18	2.23	2.15	11	0.21	-	0.07	ZC	ZC	ZS2	ZS2
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
4311	314	nd	0.12	nd	3.20	16	-	-	0.04	ZD	ZD	ND	ZS1
4402	508	-	-	-	-	1	-	-	-	ZC			
4405	579	nd	0.10	nd	2.34	32	0.12	-	0.02	ZC	ZC	ND	ND
4406	815	nd	nd	nd	nd	28	-	-	-	ZB	ZB	ND	ZS2
4407	735	nd	nd	nd	nd	24	-	-	-	ZC	ZC	ND	ND
4508	229	0.40	0.71	4.58	3.99	104	0.28	0.14	0.08	ZD	ZD	ZS3	ZS3
3302	1007	nd	nd	nd	nd	4	-	-	-	ZB	ZB	ND	ND
3303	612	nd	nd	nd	nd	7	-	-	-	ZC	ZD	ND	MP
3304	297	nd	0.17	nd	3.48	3	-	2.83	0.07	ZD	ZD	ND	ZS2
3305	362	0.25	0.25	4.24	3.89	7	0.02	0.15	0.11	ZC	ZC	ZS2	ZS2
3306	490	0.24	0.10	2.42	5.85	8	0.32	0.13	0.03	ZC	ZD	ZS2	ZS2
3307	855	nd	0.10	nd	2.19	3	-	0.50	0.05	ZB	ZC	ND	ND
4817	948	0.14	0.15	4.69	4.37	120	0.20	2.18	0.05	ZB	ZB	ZS2	ZS2
4818	1080	0.18	0.18	2.65	2.55	70	0.07	3.26	0.08	ZB	ZB	ZS2	ZS2
4819	219	0.77	0.77	3.48	4.65	139	0.21	3.06	4.06	ZD	ZD	ZS4	ZS4
4820	599	0.21	0.19	3.60	3.05	17	0.21	2.70	0.09	ZC	ZD	ZS2	ZS2
4821	234	1.05	1.15	2.05	2.91	116	0.35	0.11	-	ZD	ZD	ZS4	ZS4
5001	369	nd	0.14	nd	2.37	4	-	-	0.17	ZC	ZC	ND	ZS2
5101	378	nd	nd	nd	nd	4	-	-	-	ZC	ZD	ND	MP
5202	1024	nd	0.14	nd	2.00	2	-	-	0.01	ZB	ZB	ND	MP
5203	492	nd	nd	nd	nd	1	-	-	-	ZC		ND	
8004	426	0.16	0.16	3.84	3.85	22	0.11	3.89	0.07	ZC	ZC	ZS2	ZS2
5501	420	0.21	0.21	2.39	2.97	5	0.25	0.08	0.10	ZC	ZC	ZS2	ZS2
5504	404	nd	nd	nd	nd	14	-	-	-	ZC	ZC	ND	ND
5505	238	-	-	-	-	0	-	-	-	ZD			
5506	1510	nd	nd	nd	nd	2	-	-	-	ZA	ZB	ND	ND
5701	328	mp	mp	mp	mp	3	-	-	-	ZD	ZD	MP	ZS2
5702	581	mp	mp	mp	mp	1	-	-	-	ZC		MP	
5703	555	0.24	0.25	5.38	4.98	3	0.02	0.05	0.09	ZC	ZB	ZS2	ZS2
5805	1072	nd	0.06	nd	2.67	2	-	-	0.09	ZB	ZC	ND	
5806	320	mp	0.14	mp	3.04	12	-	-	0.06	ZD	ZD	MP	ZS2
5807	445	0.38	nd	2.60	nd	22	0.15	-	-	ZC	ZC	ZS3	ZS3
5808	691	0.10	0.07	3.21	3.26	2	0.01	-	0.00	ZC	ZC	ZS1	ZS1
5809	340	0.26	0.32	4.07	3.91	21	0.29	-	0.10	ZD	ZD	ZS2	ZS2
5810	528	0.23	0.11	2.98	4.17	34	0.26	-	0.05	ZC	ZD	ZS2	ZS2

Tablo D.1 (Devam)

5811	207	0.55	1.15	5.11	5.25	7	0.15	-	0.73	ZD	ZD	ZS4	ZS4
5812	426	0.31	0.38	2.89	2.44	4	0.21	-	0.08	ZC	ZC	ZS3	ZS3
5813	978	nd	mp	nd	mp	3	-	-	-	ZB	ZC	ND	ZS2
5814	804	0.09	0.09	4.96	5.42	13	0.08	-	0.03	ZB	ZB	ZS1	ZS1
6302	936	mp	mp	mp	mp	15	-	-	-	ZB	ZB	MP	ZS1
6303	986	mp	1.00	mp	2.31	10	-	-	0.05	ZB	ZB	MP	ZS3
6304	376	0.30	0.10	2.28	2.56	95	0.19	-	0.68	ZC	ZD	ZS3	ZS1
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
6002	447	-	-	-	-	-	-	-	-	ZC			
6006	417	0.73	nd	3.54	nd	12	0.23	-	-	ZC	ZC	ZS4	ZS4
6007	313	mp	1.07	mp	4.63	8	-	1.50	-	ZD	ZD	MP	MP
6008	248	nd	1.25	nd	3.10	9	-	-	0.05	ZD	ZD	ND	ZS4
6402	462	nd	nd	nd	nd	23	-	-	-	ZC	ZC	ND	ZS2
118	946	nd		nd		7	-			ZB	ZB	ND	ND
119	485	0.21		2.19		4	0.15			ZC	ZD	ZS2	ZS2
201	391	0.25		3.46		35	0.24			ZC	ZC	ZS2	ZS2
208	469	0.27		4.43		20	0.25			ZC	ZC	ZS2	ZS2
301	226	nd		nd		15	-			ZD	ZD	ND	ZS3
302	198	0.24		5.20		13	0.24			ZD	ZC	ZS2	ZS2
309	388	0.45		2.95		10	0.18			ZC	ZC	ZS3	ZS3
315		nd		nd		3	-			YOK!	ZD	ND	ND
401	295	0.48		4.41		20	0.07			ZD	ZD	ZS3	ZS3
403		0.44		4.08		17	0.47			YOK!	ZE	ZS3	ZS3
404		0.12		3.37		15	0.21			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
505	372	0.54		3.27		17	0.38			ZC	ZC	ZS4	ZS4
506	284	0.52		2.51		30	0.25			ZD	ZD	ZS3	ZS3
507	368	0.50		1.74		11	0.21			ZC	ZC	ZS3	ZS3
603	450	0.24		2.59		25	0.21			ZC	ZD	ZS2	ZS2
604	291	0.25		1.86		10	0.23			ZD	ZC	ZS2	ZS2
620										YOK!			
623	341	0.39		3.32		2	0.08			ZD	ZC	ZS3	ZS3
624	728	0.37		3.24		5	0.09			ZC	ZC	ZS3	ZS3
625	213	0.58		4.84		3	0.07			ZD	ZD	ZS4	ZS4
626	313									ZD			
627	255	0.87		3.93		2	0.15			ZD	ZD	ZS4	ZS4
628	300	0.57		2.86		5	0.16			ZD	ZD	ZS4	ZS4
629	528									ZC			
630	195	0.79		4.26		5	0.15			ZD	ZD	ZS4	ZS4
631	218	0.69		4.14		10	0.13			ZD	ZD	ZS4	ZS4
635		0.11		2.76		12	0.2			YOK!	ZA	ZS1	ZS1
701	920	nd		nd		10	-			ZB	ZB	ND	ND
702	507	0.06		3.86		10	0.08			ZC	ZC	ZS1	ZS1

Tablo D.1 (Devam)

704		nd		1.90		6	-			YOK!	ZD	ND	ND
705	1113	nd		1.79		15	0.38			ZB	ZB	ND	ND
706	350	0.46		5.13		5	0.08			ZD	ZD	ZS3	ZS3
708	285	0.46		4.46		8	0.2			ZD		ZS3	ZS3
709	584	0.20		3.17		3	0.2			ZC	ZC	ZS2	ZS2
710	290	mp		mp		4	-			ZD	ZD	MP	MP
711	534	0.37		3.33		5	0.1			ZC	ZC	ZS3	ZS3
801	350	0.34		2.81		11	0.15			ZD	ZD	ZS3	ZS3
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
905	369	0.24		3.55		40	0.12			ZC	ZC	ZS2	ZS2
910	271	0.47		3.08		60	0.27			ZD	ZE	ZS3	ZS3
1003	460	0.34		3.58		74	0.12			ZC	ZC	ZS3	ZS3
1005	387	mp		mp		11	0.29			ZC	ZC	MP	MP
1006	321	mp		mp		15	0.15			ZD	ZC	MP	MP
1009	561	mp		mp		19	0.27			ZC	ZC	MP	MP
1013	223	0.55		4.00		27	0.28			ZD	ZD	ZS4	ZS4
1014	397	mp		mp		21	0.13			ZC	ZD	MP	MP
1017	662	0.54		3.65		16	0.25			ZC	ZC	ZS4	ZS4
1025		0.12		2.02		9	0.12			YOK!	ZB	ZS1	ZS1
1101	901	0.13		3.27		12	0.14			ZB	ZB	ZS1	ZS1
1102	402	0.19		4.07		12	0.14			ZC	ZC	ZS2	ZS2
1201	529	mp		mp		20	0.49			ZC	ZC	MP	MP
1206	356	mp		mp		43	0.6			ZD	ZD	MP	MP
1210		0.28		3.19		25	0.31			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
1211	463	mp		mp		36	0.33			ZC	ZC	MP	MP
1302		nd		nd		35	0.24			YOK!	ZD	ND	ND
1303		mp		mp		15	0.35			YOK!	ZB	MP	MP
1401	294	0.33		4.95		110	0.29			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1402	445	mp		mp		10	0.28			ZC	ZC	MP	MP
1405	365	0.15		2.41		10	0.17			ZC	ZC	ZS2	ZS2
1412		0.32		2.30		5	0.13			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
1502	294	mp		mp		34	0.18			ZD	ZC	MP	MP
1505	367	0.52		2.07		60	0.26			ZC	ZC	ZS3	ZS3
1610	252	0.42		4.87		13	0.2			ZD		ZS3	ZS3
1611	251	0.74		3.61		21	0.24			ZD	ZD	ZS4	ZS4
1613	412	mp		mp		30	0.17			ZC	ZC	MP	MP
1614	265	mp		mp		14	0.15			ZD	ZD	MP	MP
1622	448	mp		mp		13	0.34			ZC	ZD	MP	MP
1623	377	mp		mp		16	0.13			ZC	ZC	MP	MP
1624		mp		mp		11	0.19			YOK!	ZC	MP	MP
1625	394	mp		mp		5	0.22			ZC	ZC	MP	MP
1626	448	0.46		3.61		12	0.14			ZC	ZD	ZS3	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

1701	192	bb		bb		63	0.34			ZD	ZD	ND	ND
1703	304	bb		bb		41	0.18			ZD	ZD	ND	ND
1710	286	bb		bb		52	0.15			ZD	ZD	ND	ND
1723		0.36		3.59		9	0.01			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
1802	510	bb		bb		11	-			ZC	ZC	ND	ND
1803	348	0.32		3.49		25	0.21			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1901	688	bb		bb		3	-			ZC	ZC	ND	ND
1903	255	0.52		4.18		23	0.11			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1904	193	bb		bb		22	0.12			ZD	ZD	ND	ND
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
2002	356	0.66		1.84		81	0.23			ZD	ZD	ZS4	ZS4
2009		bb		bb		19	0.41			YOK!	ZE	ND	ND
2011		bb		bb		43	-			YOK!	ZB	ND	ND
2021										YOK!			
2022										YOK!			
2023										YOK!			
2026		0.14		1.39		34	0.13			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
2101	519	0.14		2.83		6	0.02			ZC	ZC	ZS2	ZS2
2107		0.29		2.81		6	0.24			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
2301	407	nd		1.90		14	0.1			ZC	ZC	ND	ND
2302	907	bb		bb		13	0.19			ZB	ZB	ND	ND
2307	329	bb		bb		22	0.26			ZD	ZC	ND	ND
2401	314	0.38		3.44		6	0.3			ZD		ZS3	ZS3
2407	320	mp		mp		10	0.19			ZD	ZB	MP	MP
2501	375	bb		bb		42	0.23			ZC	ZC	ND	ND
2507	316	bb		bb		22	0.13			ZD	ZC	ND	ND
2601	237	0.28		3.84		7	0.09			ZD	ZC	ZS2	ZS2
2602	328	0.11		2.90		21	0.11			ZD	ZB	ZS1	ZS1
2603	630	0.36		2.71		22	0.22			ZC	ZC	ZS3	ZS3
2604	296	mp		mp		14	0.15			ZD	ZD	MP	MP
2605		bb		bb		7	-			YOK!	ZC	ND	ND
2606	348	0.26		4.58		20	0.08			ZD	ZD	ZS2	ZS2
2607	265	mp		mp		13	-			ZD	ZD	MP	MP
2608	480	0.22		2.95		5	0.02			ZC	ZC	ZS2	ZS2
2610		0.20		4.85		23	0.16			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
2611		0.21		3.33		15	0.18			YOK!	ZD	ZS2	ZS2
2612		bb		bb		20	-			YOK!	ZC	ND	ND
2613		mp		mp		20	-			YOK!	ZD	MP	MP
2614		mp		mp		20	-			YOK!	ZC	MP	MP
2615		0.47		3.19		20	0.25			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
2616		0.30		4.36		18	0.22			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
2703	758	0.15		3.27		50	0.2			ZC	ZC	ZS2	ZS2

Tablo D.1 (Devam)

2901	469	0.20		4.14		21	0.18			ZC	ZC	ZS2	ZS2
2902	594	mp		mp		18	-			ZC	ZC	MP	MP
3001		mp		mp		12	-			YOK!	ZC	MP	MP
3002		0.20		6.72		7	0.01			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
3118	310	0.25		4.45		35	0.23			ZD	ZC	ZS2	ZS2
3202		bb		bb		11	-			YOK!	ZD	ND	ND
3301	366	0.24		6.59		13	0.17			ZC	ZC	ZS2	ZS2
3407	595	0.10		2.40		30	0.08			ZC	ZB	ZS1	ZS1
3408	639	bb		bb		45	-			ZC	ZC	ND	ND
3419		0.46		3.58		20	0.08			YOK!	ZE	ZS3	ZS3
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
3420		0.13		2.40		5	0.04			YOK!	ZA	ZS1	ZS1
3503	193	0.85		6.61		80	0.2			ZD	ZD	ZS4	ZS4
3701	362	0.26		3.47		40	0.2			ZC	ZC	ZS2	ZS2
3702	514	bb		bb		13	-			ZC	ZD	ND	ND
3801	407	0.39		4.03		5	0.06			ZC	ZD	ZS3	ZS3
4001	460	0.21		2.85		11	0.08			ZC	ZC	ZS2	ZS2
4102	1000	bb		bb		6	0.1			ZB	ZB	ND	ND
4103	1013	0.17		2.53		5	0.16			ZB	ZB	ZS2	ZS2
4104	770	bb		bb		14	0.11			ZB	ZB	ND	ND
4105	289	0.59		2.51		30	0.13			ZD	ZD	ZS4	ZS4
4106	701	bb		bb		22	-			ZC	ZC	ND	ND
4107	305	bb		bb		22	-			ZD	ZD	ND	ND
4108		mp		mp		17	-			YOK!	ZD	MP	MP
4110	380	bb		bb		12	-			ZC	ZC	ND	ND
4111	300	bb		bb		32	-			ZD	ZD	ND	ND
4112	352	0.40		4.31		11	0.24			ZD	ZC	ZS3	ZS3
4113	300	bb		bb		6	-			ZD	ZC	ND	ND
4125	826	0.57		5.62		3	0.11			ZB	ZB	ZS4	ZS4
4129		0.45		5.43		2	0.07			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
4131		0.13		2.08		3	0.12			YOK!	ZB	ZS1	ZS1
4132		0.16		3.79		15	0.17			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
4202	321	bb		bb		4	-			ZD	ZD	ND	ND
4301	267	0.22		4.53		25	0.21			ZD	ZC	ZS2	ZS2
4304	343	0.35		3.95		35	0.22			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4306	304	0.33		2.83		41	0.19			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4401	481	bb		bb		37	-			ZC	ZD	ND	ND
4404	1380	mp		mp		33	-			ZB	ZC	MP	MP
4501	340	0.34		1.71		76	0.23			ZD	ZC	ZS3	ZS3
4502	292	0.40		3.84		50	0.23			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4503	358	bb		bb		30	-			ZD	ZD	ND	ND
4504	336	0.56		3.76		45	0.18			ZD	ZD	ZS4	ZS4

Tablo D.1 (Devam)

4505	629	0.72		3.06		91	0.25			ZC	ZD	ZS4	ZS4
4506	273	bb		bb		33	-			ZD	ZD	ND	ND
4610	315	0.20		2.98		10	0.03			ZD	ZC	ZS2	ZS2
4627		bb		bb		20	-			YOK!	ZD	ND	ND
4633		bb		bb		2	-			YOK!	ZD	ND	ND
4701	709	bb		bb		15	-			ZC	ZC	ND	ND
4702		bb		bb		5	-			YOK!	ZC	ND	ND
4801	466	0.24		2.32		50	0.27			ZC	ZC	ZS2	ZS2
4803	248	bb		bb		444	0.27			ZD	ZC	ND	ND
4809	747	0.10		2.43		145	0.12			ZC	ZC	ZS1	ZS1
4810	393	0.33		3.32		114	0.26			ZC	ZC	ZS3	ZS3
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
4811	372	0.28		2.99		26	0.2			ZC	ZC	ZS2	ZS2
4901	315	0.34		3.08		20	0.12			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4903		0.74		4.89		10	0.11			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
4904		bb		bb		16	-			YOK!	ZD	ND	ND
4905		0.50		2.40		15	0.24			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
4906	311	mp		mp		15	-			ZD	ZD	MP	MP
5102	678	0.15		2.39		5	0.1			ZC	ZC	ZS2	ZS2
5201	199	bb		bb		5	-			ZD	ZD	ND	ND
5401	412	0.08		4.17		271	0.08			ZC	ZC	ZS1	ZS1
5502	422	0.21		3.34		26	0.22			ZC	ZC	ZS2	ZS2
5503	246	0.20		4.70		20	0.1			ZD	ZC	ZS2	ZS2
5601		bb		bb		7	-			YOK!	ZD	ND	ND
5801	413	bb		bb		6	-			ZC	ZD	ND	ND
5803	659	bb		bb		7	-			ZC	ZC	ND	ND
5904	225	0.66		3.74		50	0.2			ZD	ZD	ZS4	ZS4
6001	324	0.55		3.62		20	0.2			ZD	ZD	ZS4	ZS4
6004	376	0.12		2.52		11	0.15			ZC	ZC	ZS1	ZS1
6005	327	0.21		8.46		9	0.14			ZD	ZC	ZS2	ZS2
6101	574	0.18		3.16		8	0.13			ZC	ZC	ZS2	ZS2
6301	652	bb		bb		41	-			ZC	ZD	ND	ND
6401	285	0.44		2.96		22	0.26			ZD	ZD	ZS3	ZS3
6501	363	0.49		3.14		21	0.14			ZC	ZD	ZS3	ZS3
6505		0.16		6.24		32	0.12			YOK!	ZD	ZS2	ZS2
6506		bb		bb		50	-			YOK!	ZD	ND	ND
6507		bb		bb		30	0.29			YOK!	ZD	ND	ND
6508		0.47		3.77		30	0.28			YOK!	ZA	ZS3	ZS3
6512	293	bb		bb		30	-			ZD	ZD	ND	ND
6601	906	0.19		2.11		10	0.09			ZB	ZB	ZS2	ZS2
6701		bb		bb		7	-			YOK!	ZD	ND	ND
6901	519	0.49		2.85		15	0.24			ZC	ZC	ZS3	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

7001	538	0.23		3.65		3	0.08			ZC	ZC	ZS2	ZS2
7101	421	0.10		4.89		15	0.09			ZC	ZC	ZS1	ZS1
7201	450	0.36		2.60		5	0.4			ZC	ZC	ZS3	ZS3
7301		0.43		2.62		25	0.12			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
7401	200	0.33		2.67		5	0.04			ZD	ZD	ZS3	ZS3
7713		0.10		2.98		16	0.09			YOK!	ZB	ZS1	ZS1
8002	430	0.12		2.00		65	0.15			ZC	ZB	ZS1	ZS1
8102	280	0.46		4.84		8	0.08			ZD	ZD	ZS3	ZS3
8103	345	0.44		4.44		12	0.08			ZD	ZD	ZS3	ZS3
8104	398	0.20		2.85		20	0.08			ZC	ZC	ZS2	ZS2
8105	914	0.16		6.53		22	0.03			ZB	ZB	ZS2	ZS2
8106	338	0.16		5.03		15	0.02			ZD	ZC	ZS2	ZS2
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
8107		bb		bb		15	-			YOK!	ZD	ND	ND
8108	487	0.40		3.20		25	0.25			ZC	ZC	ZS3	ZS3
99001	473									ZC			
99002										YOK!			
99003										YOK!			
99004	408									ZC			
99005	457									ZC			
99006	679									ZC			
99007	575									ZC			
99008	263									ZD			
99009	409									ZC			
99010	505									ZC			
99011										YOK!			
99012	309	mp		mp		3	-			ZD	ZD	MP	MP
99013										YOK!			
130										YOK!			
209		mp		mp		20	-			YOK!	ZC	MP	MP
210		0.08		3.19		20	0.07			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
212		0.65		2.26		3	0.2			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
213										YOK!			
308	357	bb		bb		10	-			ZD	ZD	ND	ND
312		0.69		3.61		35	0.23			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
313		bb		bb		6	-			YOK!	ZD	ND	ND
314		0.38		5.39		5	0.32			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
405	271	0.75		2.50		3	0.25			ZD	ZD	ZS4	ZS4
406										YOK!			
407										YOK!			
601	340									ZD			
602	419									ZC			



Tablo D.1 (Devam)

617		0.23		3.15		25	0.19			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
618		bb		bb		4	-			YOK!	ZD	ND	ND
619	265	bb		bb		8	-			ZD	ZD	ND	ND
621		0.70		6.14		8	0.11			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
622										YOK!			
632		0.36		5.52		5	0.18			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
633		0.22		6.97		3	0.16			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
634		mp		mp		6	-			YOK!	ZC	MP	MP
636										YOK!			
637		bb		bb		4	-			YOK!	ZD	ND	ND
638										YOK!			
639										YOK!			
640		0.81		3.97		3	0.6			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
641		bb		bb		7	-			YOK!	ZC	ND	ND
712	299	bb		bb		3	-			ZD	ZD	ND	ND
718		0.18		2.60		3	0.01			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
912	390	0.59		3.26		12	0.15			ZC	ZC	ZS4	ZS4
913	301	0.20		2.20		31	0.28			ZD	ZD	ZS2	ZS2
914	269	0.52		3.71		20	0.2			ZD	ZD	ZS3	ZS3
915	354	bb		bb		17	-			ZD	ZD	ND	ND
916	371	0.67		2.50		41	0.25			ZC	ZC	ZS4	ZS4
921		0.60		3.26		12	0.15			YOK!	ZC	ZS4	ZS4
922		bb		bb		8	-			YOK!	ZD	ND	ND
923										YOK!			
924										YOK!			
925										YOK!			
1008	300	0.47		5.84		36	0.25			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1011	330	0.50		3.32		50	0.23			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1021		1.23		2.44		56	0.28			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1022		0.10		4.77		25	0.05			YOK!	ZD	ZS1	ZS3
1023		0.17		3.64		27	0.15			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
1024		0.60		4.46		25	0.17			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1026		0.45		6.15		5	0.05			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
1027		bb		bb		11	-			YOK!	ZC	ND	ND
1028		0.63		3.53		7	0.2			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1103		0.50		5.43		7	0.22			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
1104		0.66		1.54		3	0.14			YOK!	ZC	ZS4	ZS4
1105		bb		bb		6	-			YOK!	ZC	ND	ND
1106		0.45		4.04		6	0.21			YOK!		ZS3	ZS3
1212		0.32		2.21		45	0.24			YOK!	ZC	ZS3	ZS3

Tablo D.1 (Devam)

1213		0.42		2.70		45	0.24			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
1215		0.48		3.59		5	0.1			YOK!	ZE	ZS3	ZS3
1304	273	0.53		3.22		10	0.14			ZD	ZD	ZS4	ZS4
1305										YOK!			
1306										YOK!			
1403	472	0.14		3.74		11	0.13			ZC	ZC	ZS2	ZS2
1413		0.75		2.19		6	0.29			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1414										YOK!			
1504	694	bb		bb		2	-			ZC	ZC	ND	ND
1619	348	0.30		3.88		26	0.13			ZD	ZB	ZS3	ZS3
1620	459	0.38		3.19		10	0.18			ZC	ZC	ZS3	ZS3
1627	249	0.46		6.44		5	0.22			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1628	488	0.86		2.25		40	0.13			ZC	ZB	ZS4	ZS4
1629	229	0.13		2.85		24	0.1			ZD	ZD	ZS1	ZS1
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
1630	301	0.33		4.22		21	0.11			ZD	ZD	ZS3	ZS3
1634		0.11		3.10		10	0.11			YOK!	ZC	ZS1	ZS1
1635		0.12		4.24		21	0.09			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
1636		0.55		2.52		12	0.35			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1637		0.07		2.16		6	0.07			YOK!	ZB	ZS1	ZS1
1638		bb		bb		4	-			YOK!	ZC	ND	ND
1639		0.20		2.81		8	0.14			YOK!	ZD	ZS2	ZS2
1640		bb		bb		13	-			YOK!	ZD	ND	ND
1641		0.82		4.74		7	0.12			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1642	366	0.45		2.70		7	0.14			ZC	ZC	ZS3	ZS3
1643		0.34		3.96		7	0.31			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
1644										YOK!			
1646		0.37		2.76		7	0.24			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
1647		0.25		3.64		4	0.17			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
1648		0.47		5.37		7	0.1			YOK!	ZB	ZS3	ZS3
1649		0.75		4.60		6	0.12			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1650		0.76		5.86		4	0.14			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1651		1.02		4.51		3	0.38			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1652		0.81		3.52		2	0.02			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1704	403	0.21		3.13		160	0.14			ZC	ZC	ZS2	ZS2
1707	324	0.34		3.65		26	0.24			ZD	ZB	ZS3	ZS3
1712	683	0.19		5.27		62	0.11			ZC	ZC	ZS2	ZS2
1718		bb		bb		62	-			YOK!	ZD	ND	ND
1719		0.74		4.39		17	0.21			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1720		bb		bb		90	-			YOK!	ZB	ND	ND
1722		0.13		4.14		11	0.11			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
1724		mp		mp		9	-			YOK!	ZD	MP	MP

Tablo D.1 (Devam)

1804		0.72		3.47		13	0.18			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1808		0.55		4.33		6	0.11			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1809		0.19		4.29		6	0.06			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
1810		0.50		4.33		4	0.29			YOK!	ZE	ZS3	ZS3
1906		0.36		4.11		20	0.12			YOK!	ZE	ZS3	ZS3
1907		0.13		7.35		2	0.09			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
1908		0.15		2.70		6	0.11			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
1909		0.58		2.94		11	0.19			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
1910										YOK!			
1911										YOK!			
2005	395	mp		mp		11	-			ZC	ZC	MP	MP
2013	345	0.52		3.01		10	0.08			ZD	ZD	ZS3	ZS3
2014	344	0.24		2.56		25	0.18			ZD	ZD	ZS2	ZS2
2015	232	bb		bb		6	-			ZD	ZD	ND	ND
2016	805	bb		bb		18	-			ZB	ZB	ND	ND
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
2024		mp		mp		25	-			YOK!	ZB	MP	MP
2025		0.57		2.31		3	0.18			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
2103		0.31		4.01		3	0.03			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
2104		bb		bb		2	-			YOK!	ZD	ND	ND
2105		0.07		2.04		6	0.06			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
2106		0.07		3.02		13	0.07			YOK!	ZB	ZS1	ZS1
2205										YOK!			
2206		0.21		5.28		6	0.24			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
2207		bb		bb		2	-			YOK!	ZD	ND	ND
2517	480	0.58		2.59		10	0.18			ZC	ZC	ZS4	ZS4
2521		mp		mp		4	-			YOK!	ZC	MP	MP
2522										YOK!			
2609	407	0.17		2.26		7	0.07			ZC	ZC	ZS2	ZS2
2617		0.25		3.95		6	0.2			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
2618										YOK!			
2619		bb		bb		2	-			YOK!	ZC	ND	ND
2620		0.07		5.68		2	0.07			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
2710		0.25		5.88		2	0.32			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
2711										YOK!			
2712	599	0.51		4.20		2	0.05			ZC	ZC	ZS3	ZS3
2713										YOK!			
2714										YOK!			
2801										YOK!			
2906										YOK!			
3123	470	0.33		2.73		7	0.24			ZC	ZC	ZS3	ZS3
3136	344	bb		bb		3	0.14			ZD	ZD	ND	ND

Tablo D.1 (Devam)

3137	688	bb		bb		20	-			ZC	ZD	ND	ND
3138	618	0.52		2.77		35	0.16			ZC	ZC	ZS3	ZS3
3139	272	0.45		5.66		20	0.31			ZD		ZS3	ZS3
3140	210	0.68		4.53		7	0.21			ZD	ZD	ZS4	ZS4
3141	338	0.24		2.43		25	0.11			ZD	ZD	ZS2	ZS2
3142	539	bb		bb		20	-			ZC	ZC	ND	ND
3146		0.06		2.40		11	0.08			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
3201	445	0.26		2.84		6	0.04			ZC	ZB	ZS2	ZS2
3203		0.95		4.50		10	0.08			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
3204		0.37		3.17		6	0.29			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
3205		0.41		3.00		5	0.09			YOK!		ZS3	ZS3
3415	283	bb		bb		45	-			ZD	ZD	ND	ND
3421		0.10		2.84		10	0.13			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
3422		0.15		5.46		9	0.1			YOK!	ZD	ZS2	ZS2
3423										YOK!	ZD		
3602	555	bb		bb		6	-			ZC	ZC	ND	ND
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
3605	270	bb		bb		8	-			ZD	ZD	ND	ND
3705										YOK!			
3805		0.25		3.71		3	0.04			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
3904		bb		bb		3	-			YOK!	ZD	ND	ND
3905		0.19		3.90		3	0.15			YOK!	ZD	ZS2	ZS2
4002		0.09		3.90		11	0.06			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
4003										YOK!			
4133		0.87		3.70		2	0.12			YOK!	ZE	ZS4	ZS4
4134										YOK!			
4135										YOK!			
4136		0.07		6.32		2	0.01			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
4137		0.29		2.88		5	0.06			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
4138		0.56		4.12		11	0.12			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
4139										YOK!			
4140		bb		bb		4	-			YOK!	ZD	ND	ND
4141		0.32		3.46		4	0.3			YOK!	ZB	ZS3	ZS3
4142		1.13		3.55		5	0.34			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
4201	385									ZC			
4209										YOK!			
4210										YOK!			
4211										YOK!			
4212										YOK!			
4309	259	0.66		3.33		35	0.18			ZD	ZD	ZS4	ZS4
4312		0.25		3.99		6	0.03			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
4313		0.10		4.31		10	0.1			YOK!	ZB	ZS1	ZS1

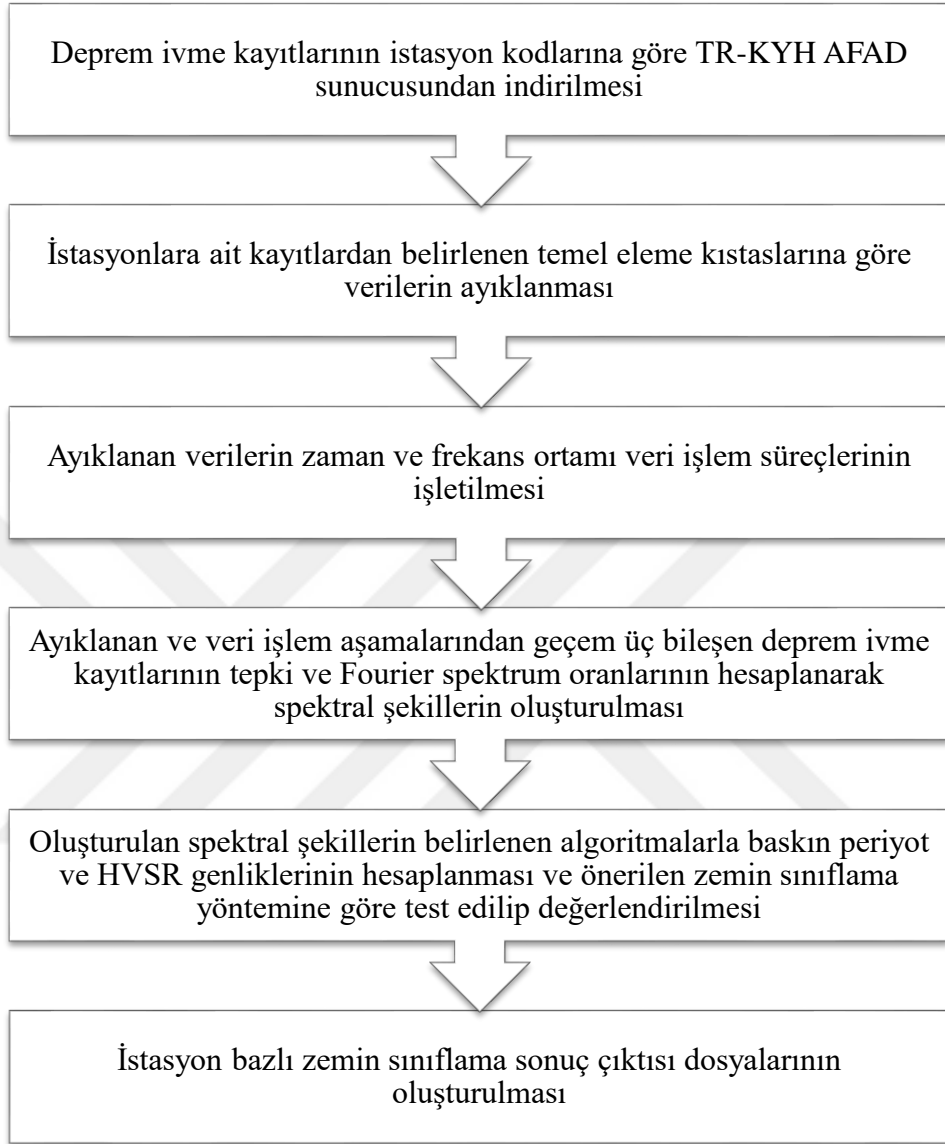
Tablo D.1 (Devam)

4314		0.68		2.78		6	0.18			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
4408	654	0.19		2.64		35	0.14			ZC	ZC	ZS2	ZS2
4409		bb		bb		5	-			YOK!	ZD	ND	ND
4410		0.12		4.06		12	0.03			YOK!	ZC	ZS1	ZS1
4412		0.33		1.94		20	0.17			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
4509		mp		mp		65	-			YOK!	ZD	MP	MP
4510		0.47		2.49		11	0.1			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
4511		0.53		3.89		5	0.2			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
4512		bb		bb		10	-			YOK!	ZD	ND	ND
4513		0.41		2.29		15	0.16			YOK!	ZC	ZS3	ZS3
4613		0.10		2.07		45	0.12			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
4615	484	0.57		2.32		25	0.3			ZC	ZC	ZS4	ZS4
4616	390	0.30		3.56		50	0.14			ZC	ZC	ZS3	ZS3
4625	346	0.34		2.64		10	0.13			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4626	317	bb		bb		8	-			ZD	ZD	ND	ND
4806	323	0.42		3.90		30	0.2			ZD	ZD	ZS3	ZS3
4807	696	0.08		3.65		30	0.11			ZC	ZC	ZS1	ZS1
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
4822		0.42		3.02		220	0.24			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
4823		0.07		1.97		220	0.06			YOK!	ZD	ZS1	ZS1
5103		0.13		2.61		3	0.01			YOK!	ZE	ZS1	ZS1
5104										YOK!			
5105										YOK!			
5301		0.11		5.44		3	0.08			YOK!	ZC	ZS1	ZS1
5406	272	0.67		4.02		6	0.55			ZD	ZD	ZS4	ZS4
5407		bb		bb		9	-			YOK!	ZB	ND	ND
5408		0.42		5.09		3	0.11			YOK!	ZB	ZS3	ZS3
5409		mp		mp		5	-			YOK!	ZC	MP	MP
5704										YOK!			
5705										YOK!			
5802	282	0.83		2.65		3	0.15			ZD	ZD	ZS4	ZS4
5804	392	0.17		4.67		5	0.01			ZC	ZC	ZS2	ZS2
5815										YOK!			
5817										YOK!			
5911		0.27		5.68		3	0.01			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
5912		bb		bb		3	-			YOK!	ZD	ND	ND
5913		0.63		6.01		3	0.17			YOK!	ZD	ZS4	ZS4
5914		bb		bb		10	-			YOK!	ZD	ND	ND
5915		0.31		4.26		3	0.21			YOK!	ZB	ZS3	ZS3
6009										YOK!			
6010		0.13		4.97		3	0.09			YOK!	ZC	ZS1	ZS2

Tablo D.1 (Devam)

6201		0.17		3.14		29	0.09			YOK!	ZB	ZS2	ZS2
6202		0.17		3.52		30	0.17			YOK!	ZC	ZS2	ZS2
6403		bb		bb		3	-			YOK!	ZD	ND	ND
6513		0.49		2.64		35	0.23			YOK!	ZD	ZS3	ZS3
6514										YOK!			
6602	694									ZC			
6603	361	0.74		4.54		4	0.22			ZC	ZB	ZS4	ZS4
6604										YOK!			
6605										YOK!			
6702		bb		bb		6	-			YOK!	ZD	ND	ND
6703		0.11		5.45		5	0.03			YOK!	ZC	ZS1	ZS1
7102		bb		bb		8	-			YOK!	ZC	ND	ND
7103		bb		bb		5	-			YOK!	ZD	ND	ND
7104										YOK!			
7302		0.10		5.96		4	0.01			YOK!	ZC	ZS1	ZS1
7501	432	bb		bb		6	-			ZC	ZC	ND	ND
7602	216	bb		bb		5	-			ZD	ZD	ND	ND
7603										YOK!			
<b>İst.</b>	<b>Vs30</b>	<b>prhv</b>	<b>pfhv</b>	<b>arhv</b>	<b>afhv</b>	<b>no</b>	<b>stdr</b>	<b>stdfk</b>	<b>stdfm</b>	<b>YZS</b>	<b>YZS_T</b>	<b>ZS</b>	<b>ZS_T</b>
7604										YOK!			
7708	196	bb		bb		20	-			ZD	ZD	ND	ND
7710	358	0.53		3.81		30	0.27			ZD	ZD	ZS4	ZS4
8003	350	bb		bb		9	-			ZD	ZD	ND	ND
8101	282	0.52		5.80		32	0.12			ZD	ZD	ZS3	ZS3
8111		0.08		4.16		10	0.06			YOK!	ZB	ZS1	ZS1

## EK-E



Şekil E1. Matlab ortamında oluşturulan program ile istasyon temelli üç bileşen deprem ivme kayıtlarının analiz edilerek zemin sınıflarının belirlenmesine ilişkin işlem adımları.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Livaoğlu H.**, Irmak T. S., An empirical relationship between seismic bedrock depth and fundamental frequency for Degirmendere (Kocaeli-Turkey), 2017, *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(20), 1-12.

**Livaoğlu H.**, Irmak T.S., Güven İ.T., Seismic vulnerability indices of ground for Deirmendere (Kocaeli Province, Turkey), *Bulletin Of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**(1), 507-517.

Şentürk E., **Livaoğlu H.**, Çepni M. S., A Comprehensive Analysis of Ionospheric Anomalies before Mw7.1 Van Earthquake on October 23 2011, *Journal of Navigation*, 2019, **72**(3), 702-720.

Yavuz E., Sertçelik F., **Livaoğlu H.**, Woith H., Lühr B., Discrimination of quarry blasts from tectonic events in the Armutlu Peninsula, Turkey , *Journal of Seismology*, 2019, **23**(1), 59-76.

Irmak T. S. , Yavuz E., **Livaoğlu H.**, Şentürk E., Şahin Y. E., Source parameters for small-moderate earthquakes in Marmara Region (Turkey), *Geosciences Journal*, 2020, **24**(5), 541-555.

**Livaoğlu, H.**, Şentürk, E. ve Sertçelik, F., A Comparative Study of Response and Fourier Spectral Ratios on Classifying Sites, *Pure Appl. Geophys*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02722-1>

Kurtuluş, C., Sertçelik, F., **Livaoğlu, H.**, Şaş, C., Investigation of Soil Characterization in Hatay Province in Turkey by Using Seismic Refraction, Multichannel Analysis of Surface Waves and Microtremor, *Earth Sciences Research Journal*, 2021, **24**(4), 473-484.



## ÖZGEÇMİŞ

Hamdullah Livaoğlu, İlkokulu 1997 yılında Fatih İlkokulu'nda, orta öğrenimini ve liseyi Samsun Anadolu Lise 'sinde 2004 yılında tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl içinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisansa başlarken, 2012 Ocak'ında Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevliliğini kazanarak burada göreve başladı. 2014 Aralık ayında Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini başarıyla tamamladı ve 2015 Şubatında aynı Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. 2021 Ocak ayından itibaren bir Kamu kurumunda mühendis olarak hizmetini sürdürmektedir.